

Ein Beitrag zur funktionalen Entwicklung eines elektromechanischen Lenksystems für sportlich orientierte Fahrzeuge

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines

DOKTORS DER INGENIEURSWISSENSCHAFTEN

DR.-ING.

genehmigte Dissertation

von

Anton Uselmann

aus

Bekabad/Usbekistan

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Dieter Schramm

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Plöchl

Tag der mündlichen Prüfung: 21.09.2017

“ Schicksal ist nie eine Frage der Chance,
sondern eine Frage der Wahl.“
Sir Isaac Newton

Danke meiner Frau für die bedingungslose Unterstützung und
meinen Eltern einfach für Alles. Diese Arbeit ist für Euch.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Notation	vii
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Hintergrund	1
1.2 Beitrag und Zielsetzung	2
1.3 Gliederung der Arbeit	3
2 Elektromechanische Lenkgetriebe	6
2.1 Funktionsweise hydraulisch unterstützter Lenkgetriebe (HPS)	7
2.2 Funktionsweise elektromechanisch unterstützter Lenkgetriebe (EPS)	8
2.2.1 EPS mit achsparallelem Antrieb (APA-EPS)	8
2.2.2 EPS mit zahnstangenkonzentrischem Antrieb (RC-EPS)	9
2.3 Vergleich und Bewertung der Systemeigenschaften	10
3 Physikalische Grundlagen der EPS	14
3.1 Modellierung mechanischer Komponenten	14
3.1.1 Modellierung der Antriebseinheit	16

3.1.2	Modellierung der Systemreibung	20
3.2	Simulation des System Übertragungsverhaltens	23
3.2.1	Lenksystem Prüfstand	29
3.2.2	Dynamisches Verhalten der Servoeinheit	31
3.3	Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis	35
4	Anforderungen an ein Lenksystem	38
4.1	Grundanforderungen	38
4.2	Charakteristische Eigenschaften eines Lenksystems	42
4.2.1	Lenkmomentniveau	42
4.2.2	Führungsverhalten	45
4.2.3	Rückmeldung	50
4.3	Funktionale Anforderungen an die Software	53
4.3.1	Lenkgefühl	53
4.3.2	Rückmeldung	55
5	Umsetzung der EPS-Anforderungen in der Software	59
5.1	Module zur Applikation des Lenkgefühls	62
5.1.1	Fahrzustandsabhängige Reibungskompensation	63
5.1.2	Fahrzustandsabhängige Dämpfung	65
5.1.3	Aktiver Rücklauf im niedrigen Geschwindigkeitsbereich	71
5.1.4	Trockene Reibung	76
5.1.5	Zusammenfassung	79
5.2	Konzepte zur Darstellung der Rückmeldung	81
5.2.1	Definition und Objektivierung der Lenkungsrückmeldung	81
5.2.2	Konventionelle Regelungsansätze der EPS	85
5.3	Unterstützungskraftregelung (UKR)	92
5.3.1	Konzept	92

5.3.2	Integration und Optimierung des Zahnstangenkraftbeobachters	97
5.3.3	Validierung der Rückmeldung im Fahrzeug	100
6	Softwareentwicklungs- und Freigabeprozess	108
6.1	Allgemeiner Systementwicklungsprozess	109
6.1.1	Softwareentwicklungsprozess nach ISO 26262	111
6.2	Szenarien der Softwareentwicklung und Absicherung	116
6.2.1	Szenario 1 - Konventionelles Vorgehen	117
6.2.2	Szenario 2 - Entwicklung und Freigabe der Funktionsmodule beim OEM	118
6.2.3	Szenario 3 - Funktionale Konzeptentwicklung beim OEM und Absicherung über einen externen Dienstleister	119
6.3	Fazit	120
7	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	123
	Publikationen und Patente	130

Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektromechanisches Lenksystem in der Vorderachse [Uselmann u. a., 2016]	6
2.2	HPS in schematischer Darstellung	8
2.3	APA-EPS in schematischer Darstellung	9
2.4	RC-EPS in schematischer Darstellung	10
2.5	Verbrauchseinsparung durch EPS-Lenkgetriebe [Pfeffer u. Har- rer, 2013]	11
2.6	Vegleich der Lenkdynamik HPS vs. EPS [Uselmann, 2012] . .	13
3.1	Modellierung der mechanischen Komponenten einer EPS . . .	15
3.2	Schnittbild der Unterstützungseinheit einer APA-EPS [Runge u. a., 2010]	17
3.3	Schema: Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) nach [Eck- stein u. Dellmann, 2013]	17
3.4	Ersatzschaltbild Gleichstrommotor [Spring, 2009]	18
3.5	Modell der Antriebseinheit [Uselmann, 2012]	19
3.6	Reibungsmodell nach [Pfeffer u. a., 2008]	20
3.7	Systemreibung über Zahnstangengeschwindigkeit	22
3.8	Schwingungsmodell EPS	23
3.9	Übertragungsverhalten des passiven EPS-Systems (blau: Refe- renzsystem, rot: dreifache Servosteifigkeit, grün: doppelte Dreh- stabsteifigkeit)	27
3.10	Dynamische Systemzustände bei 1, 7, 15 Hz Anregung (blau: Lenkradwinkel, rot: Rotorlage, grün: Zahnstangenweg)	28

3.11	Porsche Lenksystem HIL-Prüfstand [Uselmann u. a., 2016]	30
3.12	Prüfstands Aufbau Vermessung EPS-Antrieb	32
3.13	Prüfstands Aufbau Vermessung EPS-Antrieb mit Lenkaktuator	33
3.14	Motorübertragungsverhalten über Entwicklungsstufen	34
3.15	Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis [Pfeffer u. Harrer, 2013]	36
4.1	Zusammenhang der Grundanforderungen an Lenksysteme	39
4.2	Gemessene Lenkmomentverläufe bei Sportfahrzeugen [Pfeffer u. Harrer, 2013]	43
4.3	Gemessene Lenkmomentverläufe über der Querschleunigung bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	45
4.4	Lenkgefühl als Regelkreis [Wolf, 2008]	46
4.5	Kennwerte für Mittengefühl anhand einer gemessenen Hystereseschleife [Farrer, 1993]	47
4.6	Dämpfungsmaß über Eigenfrequenz eines Lenksystems nach [Mouri u. a., 2007]	49
4.7	Zeitlich Wahrnehmung einer Lenkungsrückmeldung nach [Wolf u. Bubb, 2003]	51
4.8	Bereiche der Stößigkeit und Rückmeldung im Frequenzband der Anregung [Koch, 2010]	51
4.9	Bereiche des Lenksystem-Übertragungsverhaltens nach [Brunn u. Harrer, 2004]	52
4.10	Aufbau Lenksystemprüfstand in einem Achsgestell	56
4.11	Vergleich des Übertragungsverhaltens eines passiven Lenksystems (rot) mit einem passiven Lenksystem im Achsverbund (blau)	57
4.12	Vergleich des Übertragungsverhaltens eines aktiven Lenksystems (rot) mit einem aktiven Lenksystem im Achsverbund (blau)	58
5.1	Applikationseinfluss konventioneller Konzepte (auf Lenkgefühl und Rückmeldung)	60
5.2	Einflüsse der Reibungskompensation	64
5.3	Fahrzustandsabhängige Reibungskompensation	65

5.4	Einflüsse der Dämpfung	66
5.5	Fahrzustandsabhängige Dämpfung	67
5.6	Anreißen bei geringer EPS-Dämpfung	68
5.7	Dämpfung bei Gierschwingungen	69
5.8	Anreißen mit Hands-Off-Dämpfung	71
5.9	Einflüsse des Rücklaufmoduls	72
5.10	Grundrückstellung	74
5.11	Mittenrücklauf	75
5.12	Einflüsse der trockenen Reibung	77
5.13	Trockene Reibung	78
5.14	Applikationseinfluss fahrzustandsabhängiger Konzepte auf Lenk- gefühl und Rückmeldung	80
5.15	Einfache Modellierung zur Darstellung des Übertragungsspek- trums	82
5.16	Übertragungsspektrum eines passiven EPS-Systems	83
5.17	Funktionsweise einer Servo-Ansteuerung im Hinpfad	85
5.18	Funktionsweise einer Servo-Ansteuerung im Rückpfad	86
5.19	Amplitudengang eines konventionell angesteuerten EPS-Systems	87
5.20	Funktionsweise der Handmomentregelung im Hinpfad	89
5.21	Funktionsweise der Handmomentregelung im Rückpfad	90
5.22	Übertragungsverhalten HMR vs. konventionell angesteuertes System	91
5.23	Soll-Unterstützungskraft im Schnittbild	93
5.24	Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung im Hinpfad	94
5.25	Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung im Rückpfad	95
5.26	Übertragungsverhalten UKR vs. konventionell angesteuertes System	96
5.27	Konzept des Zahnstangenkraftbeobachters für UKR	98
5.28	Zahnstangenkraftschätzung Untersteuern auf μ_{low}	99

5.29 Übertragungsverhalten UKR unter Berücksichtigung des Motorübertragungsverhaltens	100
5.30 Rückmeldung im Übersteuern	101
5.31 Rückmeldung im Untersteuern	103
5.32 Vergleich Kantenüberfahrt Hands-On	104
5.33 Rücklauf mit UKR auf μ_{low}	105
5.34 Vergleich Fahrbahnanregung Nordschleife Streckenabschnitt Schwedenkreuz	106
6.1 Systementwicklung nach dem V-Modell	110
6.2 Softwareentwicklungsprozess [ISO, 2011]	111
6.3 Mögliche Software-Entwicklungsszenarien	117
6.4 Ausgliederung der Modulentwicklung nach Szenario 2	119
6.5 Aufgabenverteilung zwischen OEM und Dienstleister nach Szenario 3	120

Tabellenverzeichnis

6.1	Empfehlung für Software-Entwurfsmethoden durch ISO 26262 [ISO, 2011]	112
6.2	Verifikationsmethoden der Modulimplementierung [ISO, 2011]	114
6.3	Empfehlung einer Testumgebung zur Software-Verifikation [ISO, 2011]	116

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
APA-EPS	Achsparell angetriebene EPS
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ATF	Automatic Transmission Fluid
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor
DAMP	Dämpfungsmodul
EHPS	Elektrohydraulische Servolenkung (Electro Hydraulic Power Steering)
EPS	Elektromechanische Lenkung (Electric Power Steering)
GU	Grundunterstützungsmoment
HOFF	Modul zur Dämpfung der Gierschwingungen
HPS	Hydraulische Servolenkung (Hydraulic Power Steering)
HW	Hardware
ISO	Internationale Organisation für Normung
KGT	Kugelgewindetrieb
MRL	Mittenrücklauf
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
OEM	Original Equipment Manufacturer
RC-EPS	Achskonzentrisch angetriebene EPS (Rack Concentric EPS)
REK	Reibungskompensation
RL	Rücklauf
SW	Software
SW-HL	Software-High-Level
TR	Trockene Reibung

Notation

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
<hr/>		
Lateinische Buchstaben:		
EG		Eigenlenkgradient
F_{ESF}	N	Anteil der Reibungskraft aus der exponentiellen Federkraft
F_{Extern}	N	Externe Kraft an der Zahnstange
F_{Hand}	N	Fahrerhandmoment übersetzt auf die Zahnstange
F_{lim}	N	Haftreibung
F_M	N	Anteil der Reibungskraft aus dem Maxwell-Element
$F_{FR,max}$	N	Reibungskraft aus dem Pfeiffer-Reibungsmodell
F_{UE}	N	Unterstützungskraft aus der Servoeinheit an der Zahnstange
$F_{ZS,Reib}$	N	Reibungskraft an der Zahnstange
$J_{ges,red}$	kgm ²	Massenträgheit der gesamten Antriebs-einheit reduziert auf die Motorachse
J_{KGT}	kgm ²	Massenträgheit des Kugelumlaufgetriebes
J_{LR}	kgm ²	Massenträgheit des Lenkrads
J_{LS}	kgm ²	Massenträgheit des Lenksäule
J_{Mot}	kgm ²	Massenträgheit des Motors
K		Proportionalitätskonstante
L_A	H	Ankerinduktivität
M_{DS}	Nm	Drehstabmoment
M_{HKB}	Nm	Moment aus dem Handkraftbeobachter
M_{Kardan}	Nm	Eingangsmoment an dem Kardangelenk
M_{LR}	Nm	Lenkradmoment

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$M_{LR,corr}$	Nm	Lenkradmoment mit Kardanfehler
M_{LS}	Nm	Ausgangsmoment an dem Kardangelenke
$M_{LS,Reib}$	Nm	Reibmoment an der Lenksäule
M_{Mot}	Nm	Eingangs-Motormoment
$M_{Mot,Reib}$	Nm	Reibmoment an der gesamten Antriebseinheit
$M_{Mot,UE}$	Nm	Ausgangs-Motormoment
R_A	Ω	Ankerwiderstand
T_{EPS}	$^{\circ}\text{C}$	gemittelte Temperatur im Lenkgetriebe
U_A	V	Ankerspannung
U_i	V	induzierte Spannung
U_L	V	Spannung über Ankerwicklung
U_R	V	Spannung über Leitungswiderstände im Anker
i_A	A	Ankerstrom
i_{Kardan}		Kardanfehler
i_{Ritzel}	m/rad	Ritzelübersetzung
i_S		Lenkübersetzung
$k_{Antrieb}$	Ns/rad	Dämpfung der Antriebseinheit
k_{DS}	Ns/rad	Drehstabdämpfung
k_{ESF}	N/m	Steifigkeitswert aus dem Pfeiffer-Reibungsmodell
$m_{ZS,eff}$	kg	effektiv auf die Zahnstange wirkende Masse
s_{ZS}	m	Zahnstangenweg
\dot{s}_{ZS}	m/s	Zahnstangengeschwindigkeit
v_{Fzg}	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
Griechische Buchstaben:		
Φ_A	Wb	Magnetischer Fluss am Anker
$\dot{\varphi}_A$	rad/s	Ankerdrehzahl
φ_{LR}	rad	Lenkradwinkel
$\dot{\varphi}_{LR}$	rad/s	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}_{LR}$	rad/s ²	Lenkradwinkelbeschleunigung
$\varphi_{LR,corr}$	rad	Lenkradwinkel mit Kardanfehler
$\dot{\varphi}_{LR,corr}$	rad/s	Lenkradwinkelgeschwindigkeit mit Kardanfehler

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
<hr/>		
φ_{Mot}	rad	Motorwinkel
$\dot{\varphi}_{Mot}$	rad/s	Motorwinkelgeschwindigkeit
φ_R	rad	Radlenkwinkel
φ_{RA}		Ackermannwinkel
φ_{Ritzel}	rad	Ritzelwinkel
$\dot{\varphi}_{Ritzel}$	rad/s	Ritzelwinkelgeschwindigkeit
$\tau_{Antrieb}$	N/rad	Steifigkeit der Antriebseinheit
τ_{DS}	N/rad	Drehstabsteifigkeit

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung und Hintergrund

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer ganzheitlichen Funktionssoftware für elektromechanische Lenkgetriebe (EPS) mit dem Zieleinsatz in sportlich ausgeprägten Fahrzeugen.

Beim Einsatz elektromechanischer Lenksysteme in sportlich-orientierten Fahrzeugen ergeben sich spezielle Anforderungen an das Lenkgefühl und die Fahrbahnrückmeldung. Die auf dem Markt erhältliche Lenksystemkonzepte stoßen hierbei an systembedingte Grenzen. Auch die Funktionssoftware vieler Lenksystemhersteller deckt diese Anforderungen bisher nicht im vollen Umfang ab.

Ausgehend von diesen Einschränkungen und den allgemeinen Eigenschaften eines Lenksystems, muss zunächst die Bedeutung der Rückmeldung für sportlich-orientierte Fahrzeuge erfasst und für elektromechanische Lenksysteme simulativ näher untersucht werden. Anschließend bedarf es einer näheren Betrachtung herkömmlicher Konzepte auf Software-Funktionsebene zur Regelung und Abstimmung von elektromechanischen Lenksystemen hinsichtlich ihres Einflusses auf ein sportliches Lenkgefühl.

Weil die höchste Anforderung an ein sportliches Lenksystem die Transparenz des Rad-Staße-Kontakts darstellt und diese beeinflusst werden soll, hat sich im Vorfeld als besonders vielversprechend das Konzept der Unterstützungskraftregelung (UKR) herausgestellt. Dieses wurde erstmals im Rahmen einer Promotion [Lunkeit, 2014] theoretisch vorgestellt. In dieser Dissertation wird ein regelungstechnischer Ansatz vorgestellt, auf Grundlage dessen die Rückmeldung im Lenksystem über dem relevanten Frequenzband ausgelegt werden

kann. Die Ergebnisse dieser Forschung basieren größtenteils auf simulativen Untersuchungen des Übertragungsverhaltens hydraulisch und elektromechanisch unterstützender Lenkgetriebe in welchen die grundsätzliche Funktion der Regelungsarchitektur nachgewiesen werden konnte.

Um diese speziellen Anforderungen unabhängig vom Lenkungszulieferer und dem Lenkungskonzept weiterhin erfüllen zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges, generisches Regelungskonzept zur Steigerung der Rückmeldung sowie zusätzliche Software-Module zur optimierten Abstimmbarkeit des Lenkgefühls entwickelt, welche in den folgenden Kapiteln ausführlich zusammengefasst werden.

1.2 Beitrag und Zielsetzung

Seitdem die elektromechanischen Lenkgetriebe vermehrt in Personenkraftfahrzeugen eingesetzt werden, stellt die Funktionssoftware einen wesentlichen Beitrag zum Lenkempfinden und -verhalten dar. Wichtigste Parameter für ein gutes Lenksystem liegen dennoch in der Grundausslegung mechanischer Komponenten mit Einfluss auf die Lenkübersetzung, die Systemsteifigkeit und das Reibungsniveau. Über die auf dem Steuergerät implementierte High-Level-Software werden die charakteristischen Eigenschaften des gesamten Fahrzeugs bezüglich Lenkverhalten wesentlich beeinflusst. Neben der Bereitstellung der Lenkunterstützung muss die Software über eine Schnittstelle die Umsetzung der Fahrerassistenzsysteme mit Zugriff auf Lenkwinkel und Lenkmoment ermöglichen.

In dieser Arbeit wird ein methodisches Vorgehen beim Konzipieren, Umsetzen und Validieren einer Lenksystem-Funktionssoftware beschrieben, welches initial die Anforderungen an das Lenkverhalten aus Kunden- sowie OEM-Sicht berücksichtigt.

Zusätzlich zu den Methoden werden die erarbeiteten Umsetzungskonzepte einzelner Funktionsmodule sowie unterschiedliche Architekturvarianten funktional beschrieben und bezüglich ihrer Wirkung bei der Umsetzung der Anforderungen diskutiert.

Weil die Methode die Funktionsentwicklung bis zur Serienreife berücksichtigt, wird in der vorliegenden Arbeit der Entwicklungsprozess ebenfalls mit Hinblick auf die Vorgaben der funktionalen Sicherheit nach ISO26262 erläutert und mögliche Arbeitsteilungsszenarien bei der Gesamtsoftwareentwicklung zwischen OEM und Lieferant vorgestellt.

Die grundsätzliche Zielsetzung besteht darin, einen wissenschaftlich fundierten Leitfaden bei einer initialen Funktionsentwicklung sowie einer Weiterentwicklung bzw. Optimierung eines Lenksystems bereitzustellen.

Den wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit stellen die erarbeiteten Parametrierungs- und Objektivierungsmethoden des Lenkgefühls zur qualitativen Verbesserung und Effizienzsteigerung des meist subjektiven Abstimmungsprozesses bei Lenksystemen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist wie im Folgenden beschrieben strukturiert.

Kapitel 1

In diesem Kapitel werden die Hintergründe für diese Arbeit erläutert, die generalisierend die Motivation für eine ganzheitlich überarbeitete Funktionssoftware für elektromechanische Lenkgetriebe verdeutlichen. Des Weiteren werden die Art sowie die globalen Ziele der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Überblick über die Struktur dieser Arbeit gegeben.

Kapitel 2

Im zweiten Kapitel werden die Konzepte hydraulisch sowie elektromechanisch unterstützter Lenksysteme dargestellt. Bei elektromechanischen Lenkgetrieben werden zwei für diese Arbeit relevante EPS-Bauarten erläutert. Neben dem mechanischen Aufbau der Systeme werden die Funktionsweisen näher beschrieben sowie ein Vergleich der Systeme mit ihren Vor- und Nachteilen durchgeführt. Es soll ein Verständnis für die unterschiedlichen Bauarten bzgl. Funktionalität und Anforderungen geschaffen werden.

Kapitel 3

In Kapitel drei werden die physikalischen Eigenschaften elektromechanischer Systeme erklärt. Es wird in die Modellierung der schwingungsdynamischen Komponenten eingeführt, physikalische Zusammenhänge sowie empirische Modelle dargestellt. Desweiteren wird das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems sowie der Teilkomponenten anhand von Zustandsgleichungen

und Simulationsmodellen aufgezeigt und die Einflüsse wichtiger mechanischer Parameter mit Hilfe von Simulationsergebnissen diskutiert.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Zusammenhänge stellen Werkzeuge in der funktionalen EPS-Entwicklung dar und dienen ebenfalls als wichtige Validierungsmethoden bei der Untersuchung unterschiedlicher Regelungskonzepte.

Kapitel 4

Das Kapitel 4 besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Grundanforderungen an das Lenksystem im Ganzen zusammengefasst und einzeln diskutiert. Im zweiten Teil werden aus diesen Grundanforderungen extrahierte Anforderungen an die Funktionssoftware vorgestellt. Wichtige Objektivierungsmethoden zur Verifizierung und Validierung dieser Kriterien werden erläutert und den jeweiligen Hauptmerkmalen (Lenkgefühl, Rückmeldung) zugeordnet. Weil die Arbeit in erster Linie sportliche Fahrzeuge berücksichtigt, werden die Anforderungen unter entsprechenden Gesichtspunkten bewertet.

Kapitel 5

Das fünfte Kapitel stellt die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit dar.

Hier werden Umsetzungskonzepte der in Kapitel vier definierten Anforderungen vorgestellt. Ebenso wie die Anforderungen werden hier auch die Konzepte in zwei Kategorien eingeteilt: Lenkgefühl und Rückmeldung. Jedes aus den Anforderungen gebildete Funktionsmodul wird schematisch bzgl. Funktion und jeweiligem Einsatzfeld erläutert. Es werden Empfehlungen bzgl. Applikation gegeben und der Einflussbereich bei entsprechender Abstimmung dargestellt.

Neben den einzelnen Funktionsmodulen werden drei unterschiedliche Regelungsarchitekturen vorgestellt und anhand subjektiver Kriterien mit Hinblick auf Rückmeldungspotential und Entwicklungsaufwand miteinander verglichen.

Weil die Umsetzung des Unterstützungskraftreglers auf einem Serienlenkgetriebe den Kern dieser Arbeit darstellt, wird in diesem Kapitel der UKR-Regelungsansatz besonders umfassend vorgestellt und die resultierenden Vorteile ausführlich anhand von Messergebnissen aus Prüfstand-Untersuchungen und Fahrzeugversuchen diskutiert.

Kapitel 6

Nachdem die vorherigen Kapitel methodisch den Bereich der Konzeptphase einer EPS-Funktionsentwicklung abdecken, wird im Kapitel 6 der definierte Entwicklungsprozess nach ISO26262 für ein Bauteil mit der höchsten Integritätsstufe (ASIL-D), wie die EPS, vorgestellt. Neben dem festgesetzten Prozess, werden hier zusätzlich unterschiedliche Umsetzungsvarianten dieses Prozesses erörtert und aus Sicht eines OEMs miteinander verglichen.

Kapitel 7

Im letzten Kapitel werden die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dieser Arbeit zusammengefasst. Des weiteren wird kurz auf den Umsetzungsstand eingegangen und ein kleiner Ausblick weiterer Entwicklungsaktivitäten gegeben.

Kapitel 2

Elektromechanische Lenkgetriebe

In diesem Kapitel werden die Grundeigenschaften elektromechanischer Lenkgetriebe zusammengefasst. Ein solches Lenksystem im Verbund mit der Fahrzeug-Vorderachse ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

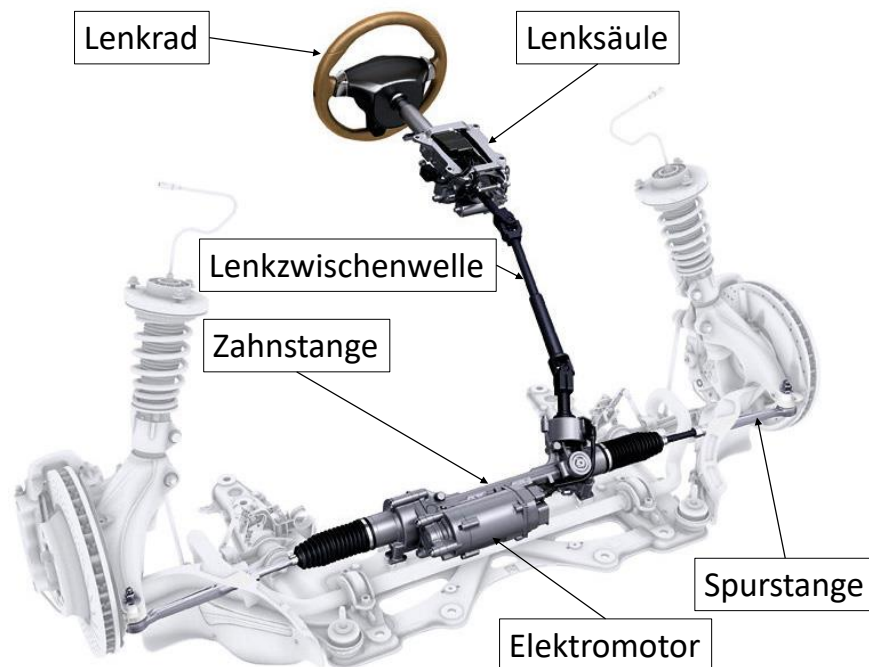


Abbildung 2.1: Elektromechanisches Lenksystem in der Vorderachse
[Uselmann u. a., 2016]

Es wird ein Überblick über die Grundanforderungen aus Kundensicht gegeben sowie die Einflüsse auf das Lenksystem im Regelkreis des Gesamtfahrzeugs mit dem Fahrer dargestellt.

Dieser Überblick stellt alle funktionalen Grundaspekte einer EPS zusammen und bietet somit die Basis für eine das Gesamtsystem umfassende Funktionsentwicklung auf SW-Ebene.

Konventionelle servounterstützte Lenkgetriebe lassen sich aus Sicht der Kraftbereitstellung in zwei Gruppen unterteilen. So gibt es Lenkgetriebe mit hydraulischer Unterstützung (HPS) sowie Lenksysteme mit elektromechanischer Unterstützung (EPS). Als eine Sonderbauform existieren Lenksysteme, bei denen der hydraulische Kraftfluss durch einen Elektromotor bedarfsgerecht geregelt wird (EHPS).

Im Folgenden werden die meistverbreiteten und für diese Arbeit relevanten Lenksystembauarten näher vorgestellt.

2.1 Funktionsweise hydraulisch unterstützter Lenkgetriebe (HPS)

Eine hydraulische Servolenkung stellt die Unterstützungskraft durch entsprechende Hydraulikeinrichtungen bereit. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, besteht ein solches Lenksystem aus einem mechanischen Grundsystem, das vom Fahrer angeregt wird sowie hydraulischen Komponenten, die eine Unterstützungskraft auf die Zahnstange übertragen.

Über ein in der Lenkwelle (2) angeordnetes, hydraulisches Steuerventil (3) dosiert der Fahrer als Folge des von ihm eingebrachten Lenkmoments im Lenkrad (1) die von einer direkt vom Verbrennungsmotor des Fahrzeugs angetriebenen Hydraulikpumpe (5) erzeugte Hilfsenergie. Der Servozylinder (6) ist direkt in die Zahnstange (4) integriert und sorgt für die Übertragung der Hilfsenergie.

Bei einer klassischen Hydrolenkung durchströmt ein, bei laufendem Fahrzeugmotor durch die meist über Keilriemen angetriebene Hydraulikpumpe (Flügelzellen- oder Rollenpumpe) erzeugter Ölstrom (aus ATF-Ölen), einen in Neutralstellung des Lenkventils offenen Steuerspalt. Dieser Ölstrom gelangt nahezu drucklos zum Ölbehälter des Lenksystems zurück. Dort wird das ankommende Öl wieder angesaugt und der permanent zirkulierende Ölkreislauf im Lenksystem aufrechterhalten.

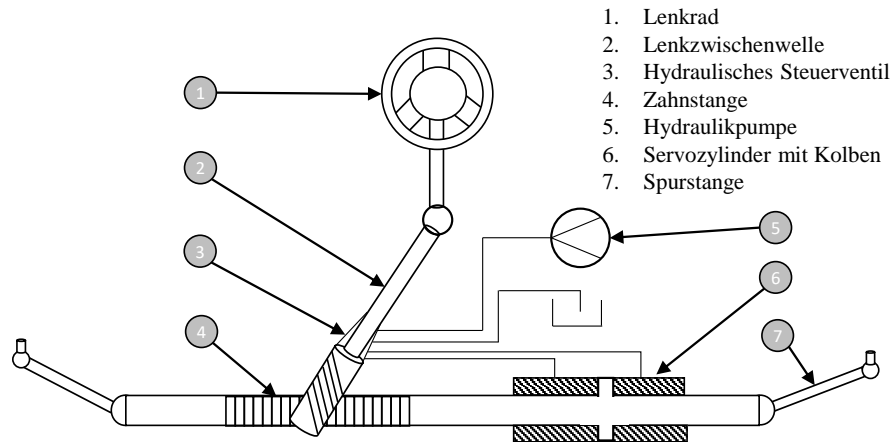


Abbildung 2.2: HPS in schematischer Darstellung

Da dieser Ölförderstrom der Lenkpumpe linear mit der Motordrehzahl steigt - unabhängig davon, ob Lenkarbeit geleistet wird oder nicht - ist die Energieeffizienz eines solchen Systems bei vielen Fahrzuständen ungünstig. Dies heißt, je weniger Lenkarbeit abgefordert wird und je höher dabei die Motordrehzahl ist (zum Beispiel bei schneller Autobahnfahrt), desto ungünstiger ist der energetische Wirkungsgrad dieses Systems.

2.2 Funktionsweise elektromechanisch unterstützter Lenkgetriebe (EPS)

2.2.1 EPS mit achsparallelem Antrieb (APA-EPS)

Der Aufbau eines elektromechanischen Lenkgetriebes mit achsparallel angeordneter Antriebseinheit (APA-EPS) mit den wichtigsten Komponenten ist in der folgenden Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.

Die rotatorisch eingeleitete Lenkeingabe des Fahrers wird über das Ritzel (4) und die Verzahnung der Zahnstange (3) in eine translatorische Bewegung übersetzt. An der Zahnstange sind an beiden Enden Spurstangen (8) über Kugelgelenke angebunden. Diese verbinden das Lenkgetriebe mit den Radträgern und bewirken bei einer Verschiebung die entsprechende Radlenkwinkeländerung.

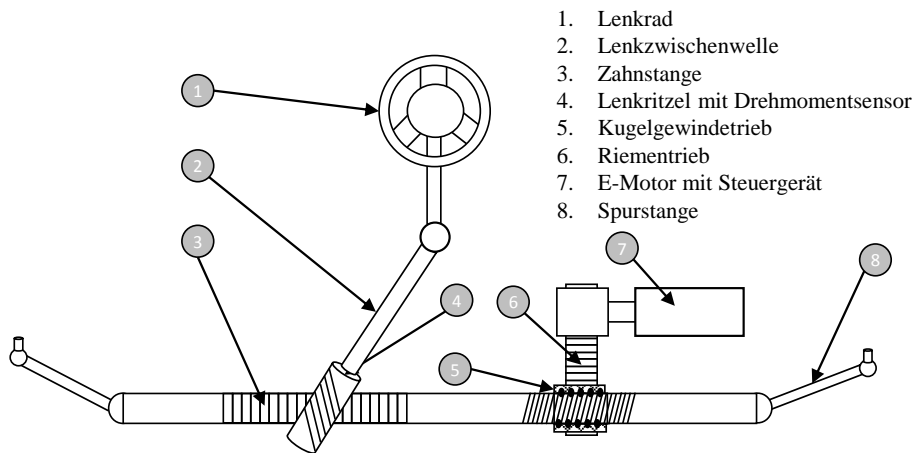


Abbildung 2.3: APA-EPS in schematischer Darstellung

Zur Reduzierung des Fahrerlenkmoments verfügt eine APA-EPS über einen, parallel zur Zahnstangenachse angebrachten, bürstenlosen Gleichstrommotor (BLDC) (7), der in Abhängigkeit des vorherrschenden Drehmoments am Ritzel und der Fahrzeuggeschwindigkeit angesteuert wird. Die Motorsteuerung berechnet bis zu 2500 Mal pro Sekunde einen aktualisierten Ansteuerbefehl zur Generierung des Unterstützungsmoments Jablonski u. a. [2008].

Das Fahrerlenkmoment wird durch einen Sensor am Drehstab ermittelt, der in der Lage ist, die Verdrehung des Drehstabs zu messen. Mit Hilfe der bekannten Drehstabsteifigkeit und der gemessenen Verdrehung kann das anliegende Moment berechnet werden. Der Lenkmomentsensor des verwendeten Lenkgetriebes detektiert diese Verdrehung mit analogen Hall-Sensoren, die zur Absicherung der Signalverfügbarkeit redundant ausgeführt sind.

Die Übertragung des Unterstützungsmoments des Motors auf die Zahnstange erfolgt über ein Getriebe, das aus einem Riementrieb (6) und einem Kugelgewindetrieb (KGT) (5) besteht.

2.2.2 EPS mit zahnstangenkonzentrischem Antrieb (RC-EPS)

Als RC-EPS werden elektromechanische Lenkgetriebe bezeichnet, bei denen die Antriebseinheit, das heißt der Elektromotor, auf der gleichen Achse wie die Zahnstange liegt, siehe Abbildung 2.4.

Als kraftübertragendes Getriebe wird bei diesem Lenksystem ein Kugelgewindetrieb verwendet. Im Gegensatz zur APA-EPS bedarf es hier keines Riemenantriebs, da der Hohlwellenrotor des Elektromotors fest mit dem KGT-Gehäuse verbunden ist.

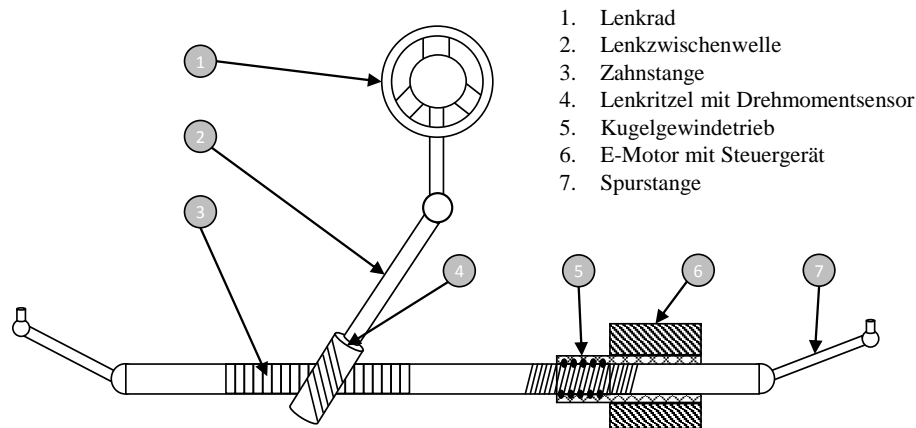


Abbildung 2.4: RC-EPS in schematischer Darstellung

Als Folge dieser Bauweise fehlt der RC-EPS im Vergleich zur APA-EPS eine Getriebestufe. Aus diesem Grund muss bei diesem Lenksystem ein Elektromotor verbaut werden, der ein höheres Drehmoment abgeben kann. Damit die Ströme nicht signifikant steigen, wird der Elektromotor zwangsweise größer, was sich negativ auf den Bauraumbedarf auswirken kann.

2.3 Vergleich und Bewertung der Systemeigenschaften

Ein hydraulisches Servolenksystem verfügt über eine große Anzahl an Komponenten (Pumpe, Schläuche, Lenkgetriebe, Ausgleichsbehälter usw.). Im Fahrzeug müssen diese Komponenten bei einer Montage miteinander verbunden, hydraulisch befüllt und anschließend auf Dichtigkeit überprüft werden. Bei einem elektromechanischen Lenksystem entfallen diese Schritte, da es als komplett montierte und geprüfte Einheit an den OEM ausgeliefert werden kann. Die Lenkung muss lediglich im Fahrzeug montiert und elektrisch mit dem Bordnetz verbunden werden. Diese vereinfachte Montage einer EPS-

Einheit hat große Einsparungen in der Produktion zur Folge und bietet weniger Raum für mögliche Montagefehler.

Ein weiterer Vorteil elektromechanischer Lenksysteme ist die bedarfsgerechte Ansteuerung der Unterstützungseinheit. Es wird nur dann Energie bereitgestellt, wenn auch gelenkt wird. Man spricht hierbei auch von einem Power-On-Demand-System. Aufgrund dieser Eigenschaft wird eine sehr geringe Energieaufnahme des Lenksystems ermöglicht, was sich stark reduzierend auf den Kraftstoffverbrauch und folglich den CO₂-Ausstoß auswirkt [Poirel, 2012], [Runge u. a., 2010], [Brunnschweiler, 2005]. In Abbildung 2.5 wird die Kraftstoff- und CO₂-Reduzierung für ein Mittelklassefahrzeug mit einem 2,0 Liter Benzinmotor verdeutlicht.

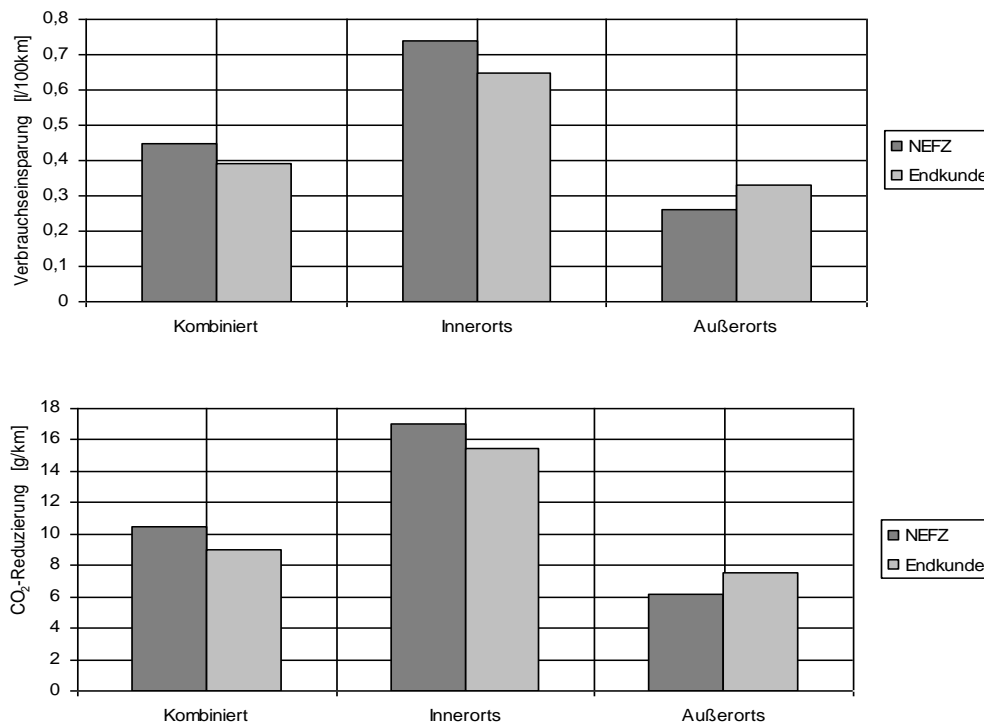


Abbildung 2.5: Verbrauchseinsparung durch EPS-Lenkgetriebe [Pfeffer u. Harrer, 2013]

Die Abbildung 2.5 zeigt, dass durch den Einsatz eines EPS-Lenkgetriebes Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch von bis zu 0,7 Liter pro 100 Kilometer und bei CO₂-Emissionen bis circa 16 g/km möglich sind. Aufgrund des positiven Umwelteinflusses und der daraus resultierenden gesetzlichen Vorgaben empfiehlt sich der Einsatz dieser Technologie in allen Fahrzeugklassen.

Eine neue Herausforderung bei der Entwicklung eines EPS-Lenksystems ist die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an ein mechatronisches System. Viele dieser Maßnahmen waren bei hydraulischen Lenkgetrieben nicht erforderlich. Auch das akustische Verhalten eines elektromechanischen Systems kann ungünstiger sein und muss im Laufe des Entwicklungsprozesses stets berücksichtigt werden. Durch die Verwendung von Elektromotoren und Getriebestufen entstehen Vibrationen, die so entkoppelt werden müssen, dass der Schwingungskomfort durch die Verwendung einer EPS-Lenkung keine Verschlechterung erfährt.

Ein großer Vorteil eines elektrischen Lenksystems ist die Möglichkeit der Einführung zusätzlicher Assistenz- und Sicherheitssysteme. Zu den wichtigsten Funktionen zählen hierbei:

- automatische Einparkassistenten, bei denen die Lenkung das Fahrzeug autonom rangiert,
- Spurhalteassistent, bei dem die Lenkung ein überlagertes Lenkmoment zur Spurhaltung stellt,
- Spurverlassenswarner mit Vibration im Lenkrad beim Überfahren der Fahrbahnmarkierung,
- Ausweichassistent, bei dem die Lenkung einem zum Ausweichen notwendigen Lenkwinkel einstellt und
- μ -Split-Assistent, bei dem das Lenksystem bei der Bremsung oder Beschleunigen auf μ -Split ein stabilisierenden Radlenkwinkel einstellt.

Weitere Faktoren, die den Einsatz einer EPS rechtfertigen, ergeben sich aus der höheren Umweltfreundlichkeit durch den Entfall von Öl und der gesteigerten Systemstabilität gegenüber Fertigungstoleranzen, die durch den Wegfall des Ansteuerungsservoventils im Drehstab entstehen.

Früher musste das gewünschte Verhalten durch eine aufwendige Auslegung dieser Ventile festgelegt werden. Bei der EPS kann die Unterstützungsscharakteristik durch Software nahezu beliebig verändert werden, ohne dass mechanische Änderungen notwendig sind. Der Fahrerwunsch wird hierbei über die Drehmomentsensorik im Drehstab erfasst. Die Software ermöglicht es zudem eine genaue Grenze zwischen den Nutz- und Störinformationen in der Rückmeldung zu ziehen. Es eröffnet sich die Möglichkeit, nur die Nutzinformationen zum Fahrer gelangen zu lassen und gleichzeitig die Störinformationen abzuschwächen.

Ein wichtiger Faktor zur Bewertung eines Lenksystems ist die Lenkdynamik. Soll in einem Fahrzeug mit einer EPS-Lenkung die gleiche Fahrdynamik wie mit einem konventionellen HPS-Lenkensystem erreicht beziehungsweise überschritten werden, so muss sichergestellt werden, dass die Antriebseinheit in der Lage ist, die gleiche bzw. höhere Leistung wie ein hydraulisches System abzugeben. Dieses wird in repräsentativen Manövern überprüft, in Leistungsdiagrammen zusammengeführt und anhand von Lastenheftanforderungen bewertet. Ein Vergleich zwischen der Lenkdynamik eines HPS- und EPS-Lenkensystems in einem Porsche Carrera (997 und 991) ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

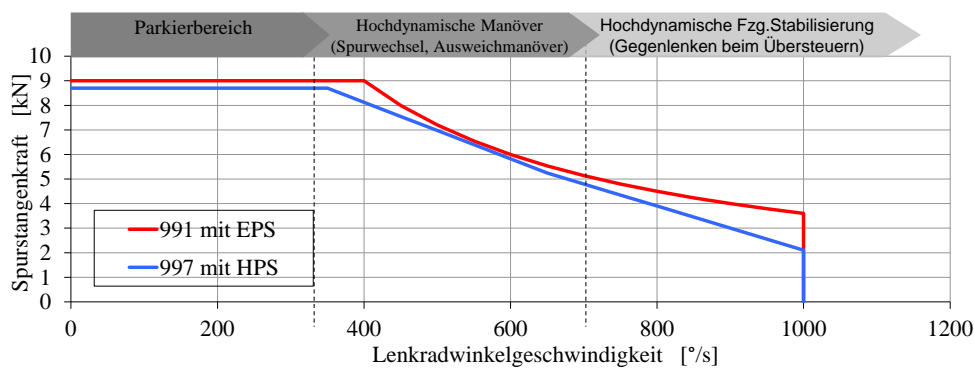


Abbildung 2.6: Vergleich der Lenkdynamik HPS vs. EPS [Uselmann, 2012]

In dieser Auswertung ist erkennbar, dass mit Hilfe des elektromechanischen Lenksystems in einem Porsche 991 die Lenkdynamik in allen Fahrzuständen gegenüber dem HPS-System im Vorgängermodell gesteigert werden konnte.

Kapitel 3

Physikalische Grundlagen der EPS

3.1 Modellierung mechanischer Komponenten

Rein mechanische Komponenten eines Lenksystems bestehen aus dem Lenkstrang, welcher über ein Ritzel mit der Zahnstange verbunden ist. Der Aufbau dieser Komponenten mit den jeweiligen schwingungstechnischen und mechanischen Parametern sowie den wirkenden Kräften ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Auf das System des Lenkstrangs wirkt am Eingang über das Lenkrad das Lenkradmoment M_{LR} sowie der Lenkwinkel φ_{LR} und die Lenkradwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_{LR}$. Des Weiteren muss das Trägheitsmoment J_{LR} des Lenkrads und der Lenksäule berücksichtigt werden.

Aufgrund der Einbaulage des Lenkstrangs wird zwischen Lenksäule und Lenkzwischenwelle ein Kardangelenkbaut verbaut. Die Ungleichmäßigkeit der Momentenübertragung an diesem Gelenk wird durch die winkelabhängige Übersetzung i_{Kardan} beschrieben.

$$i_{Kardan} = \frac{\varphi_{Ritzel}}{\varphi_{LR}} = \frac{M_{LS}}{M_{Kardan}}. \quad (3.1)$$

Es ist sinnvoll das gesamte Lenksysteme in drei Teilsysteme freizuschneiden, wie es in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Die Freischnitte sind an dem Kardangelenkbaut und an der Ritzel-Zahnstange-Kontaktfläche. Das oberste Teil-

system beschreibt das Lenkrad inklusive Lenksäule und Lenkzwischenwelle. Das mittlere besteht aus dem Drehstab und das untere aus der Zahnstange inklusive Spurstangen und Faltenbälge.

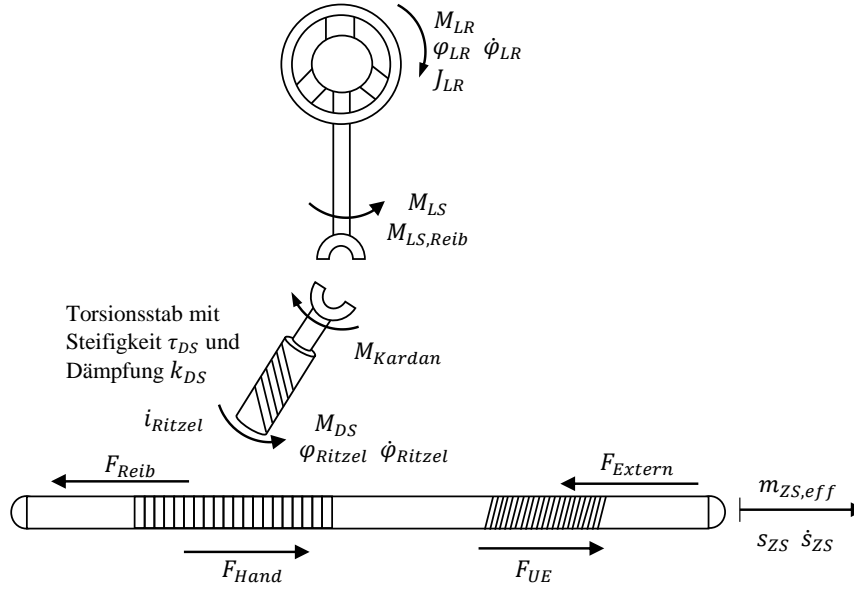


Abbildung 3.1: Modellierung der mechanischen Komponenten einer EPS

Das erste Teilsystem kann mit dem Drallsatz für das Lenkrad wie in den Gleichung 3.2 dargestellt, berechnet werden.

$$J_{LR} \cdot \ddot{\varphi}_{LR} = M_{LR} - M_{LS} - M_{LS,Reib}. \quad (3.2)$$

Die Gleichung für das zweite System ist in 3.3 zu sehen. Bei diesem Teilsystem wird die rotatorische Trägheit des Drehstabs vernachlässigt und das Drehstabsmoment anhand der Verdrehung in der Torsionswelle mit der Steifigkeit τ_{DS} und der Dämpfung k_{DS} bestimmt.

$$M_{Kardan} = M_{DS} = \tau_{DS} \cdot (\varphi_{Ritzel} - \varphi_{LR} \cdot i_{Kardan}) + k_{DS} \cdot (\dot{\varphi}_{Ritzel} - \dot{\varphi}_{LR} \cdot i_{Kardan}). \quad (3.3)$$

Nun können die beiden Teilsysteme über die Gleichung 3.1 mit einander verknüpft werden wie in der Gleichung 3.4 dargestellt.

$$i_{Kardan} = \frac{M_{LR} - M_{LS,Reib} - J_{LR} \cdot \ddot{\varphi}_{LR}}{\tau_{DS} \cdot (\varphi_{Ritzel} - \varphi_{LR} \cdot i_{Kardan}) + k_{DS} \cdot (\dot{\varphi}_{Ritzel} - \dot{\varphi}_{LR} \cdot i_{Kardan})}. \quad (3.4)$$

Demnach ergibt sich für das Lenkradmoment M_{LR} folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} M_{LR} &= M_{LS,Reib} + J_{LR} \cdot \ddot{\varphi}_{LR} \\ &+ i_{Kardan} \cdot (\tau_{DS} \cdot (\varphi_{Ritzel} - \varphi_{LR} \cdot i_{Kardan}) \\ &+ k_{DS} \cdot (\dot{\varphi}_{Ritzel} - \dot{\varphi}_{LR} \cdot i_{Kardan})). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Die Kräfte an dem Teilsystem Zahnstange werden anhand des Schwerpunktsatzes in Zusammenhang gesetzt.

$$F_{Hand} = \frac{M_{DS}}{i_{Ritzel}}, \quad (3.6)$$

$$m_{ZS,eff} \cdot \ddot{s}_{ZS} = F_{Hand} + F_{UE} - F_{ZS,Reib} - F_{Extern}. \quad (3.7)$$

Auf die Zahnstange wirken demnach die Handkraft aus dem Lenkstrang F_{Hand} , die Unterstützungskraft aus der Servo-Einheit F_{UE} , die Seitenkraft aus der Fahrbahn F_{Extern} , die Lenksystemreibung $F_{ZS,Reib}$ sowie die Beschleunigungskraft der effektiven Zahnstangenmasse $m_{ZS,eff}$.

3.1.1 Modellierung der Antriebseinheit

In Abbildung 3.2 ist beispielhaft die Antriebseinheit einer APA Lenkung der Firma Robert Bosch Automotive Steering GmbH im Schnitt dargestellt. In dieser Darstellung lässt sich die permanenterregte Gleichstrommaschine in Innenläuferbauweise mit den Übersetzungsstufen des Riemens und des Kugelgewindetriebs sehr gut erkennen.

Bei elektromechanischen Lenkgetrieben werden üblicherweise bürstenlose Gleichstrommotoren eingesetzt. Ein bürstenloser Motor (BLDC) ist dadurch gekennzeichnet, dass im Vergleich zum konventionellen permanenterregten Gleichstrommotor, Stator und Rotor ihre Position tauschen (s. Abbildung 3.3). Der Rotor wird durch Permanentmagnete realisiert und der Stator enthält die Wicklungen. Durch diese Bauweise können die Kohlebürsten im Läufer entfallen, da nun der Stator mit Strom versorgt wird. Der Motor ist somit im Idealfall wartungsfrei. Durch die Verwendung von Dauermagneten können bei permanenterregten Motoren hohe Wirkungsgrade und hohe Leistungsdichten erzielt werden [Runge u. a., 2010], [Uselmann, 2012].

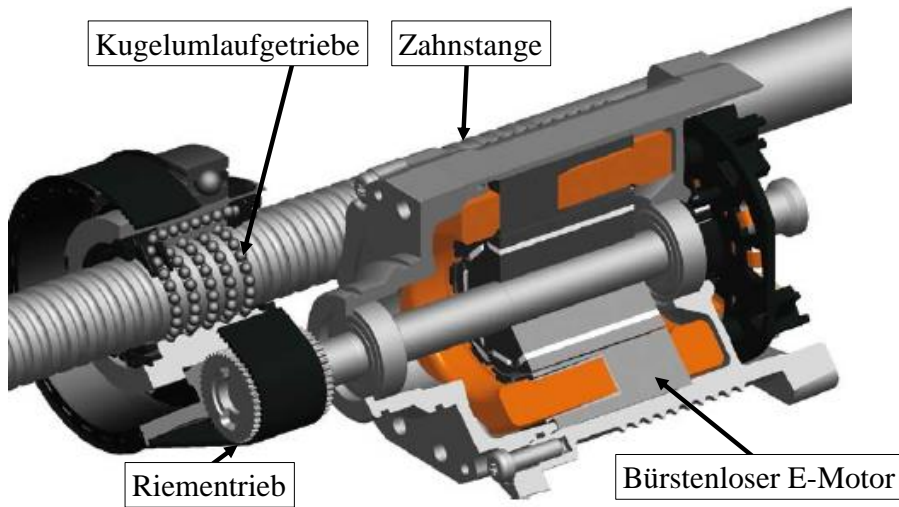


Abbildung 3.2: Schnittbild der Unterstützungseinheit einer APA-EPS [Runge u. a., 2010]

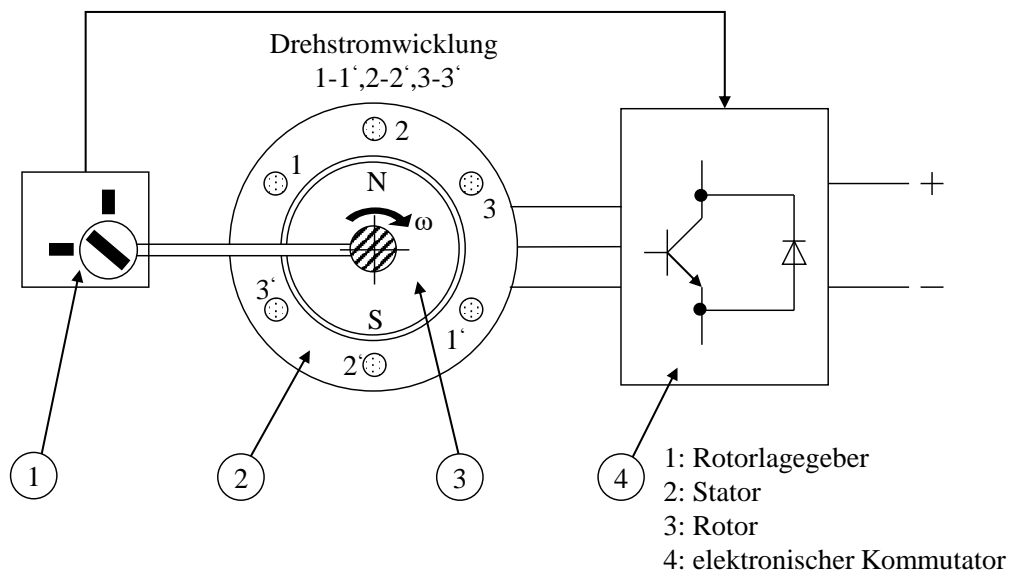


Abbildung 3.3: Schema: Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC) nach [Eckstein u. Dellmann, 2013]

Ein BLDC wird so angesteuert, dass der Vektor des Statorflusses mit dem Vektor des Rotorflusses, der durch die Permanentmagneten erzeugt wird, durchschnittlich einen Winkel von 90° bildet. Um diese Ansteuerung realisieren zu können, muss die Lage des Rotors zu jedem Zeitpunkt genau bekannt

sein. Hierzu wird ein Hall-Sensor als Lagesensor eingesetzt. Die Auswertung der Sensorsignale und die Ansteuerung der Statorwicklungen erfolgt über das motorinterne Steuergerät. Ein weiterer Vorteil dieser Elektromotorengattung ist neben dem Wegfall der Kohlebürsten auch die Eliminierung der Kommutierungsgrenze, das Produkt aus Ankerstrom i_A und der Drehzahlfrequenz ist nicht konstant. So kann der BLDC-Motor ein hohes Drehmoment über einen weiten Drehzahlbereich zur Verfügung stellen [Eckstein u. Dellmann, 2013].

Modellbasiert lässt sich ein Gleichstrommotor nach dem Ersatzschaltbild in Abbildung 3.4 beschreiben.

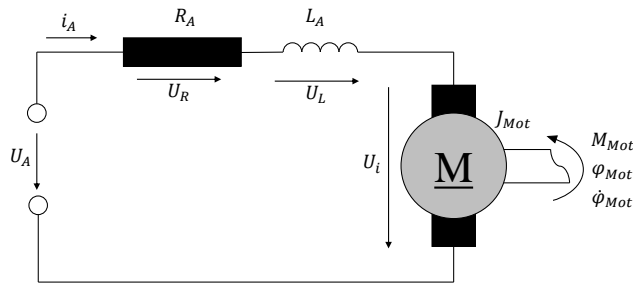


Abbildung 3.4: Ersatzschaltbild Gleichstrommotor [Spring, 2009]

Das Schaltbild besteht aus folgenden in Reihe geschalteten Elementen:

- einer Spannungsquelle U_A ,
- einem Leitungswiderstand R_A ,
- einer Ankerinduktivität L_A
- und einem Verbraucher M .

Unter Verwendung der 2. Kirchhoff Regel lässt sich für den Stromkreis die folgende Maschengleichung aufstellen.

$$U_A = U_R + U_L + U_i \quad (3.8)$$

Durch die Bewegung des Ankers im magnetischen Kreis wird am Rotor die Spannung U_i erzeugt, die sich wie folgt berechnen lässt [Schramm u. a., 2017]:

$$U_i = K \cdot \Phi_A \cdot \dot{\varphi}_A. \quad (3.9)$$

Mit den Gleichungen für Spannung an den Widerständen

$$U_R = R_A \cdot i_A \quad (3.10)$$

und Induktionsspannung über den Wicklungen

$$U_L = L_A \cdot \frac{\delta i_A}{\delta t} \quad (3.11)$$

lässt sich für den Stromkreis die folgende Differentialgleichung aufstellen

$$U_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{\delta i_A}{\delta t} + K \cdot \Phi_A \cdot \dot{\varphi}_A. \quad (3.12)$$

Das am Motor abgegebene Moment M_{Mot} kann unter Verwendung des magnetischen Flusses und des Ankerstroms berechnet werden

$$M_{Mot} = K \cdot \Phi_A \cdot i_A. \quad (3.13)$$

Um das tatsächlich an der Zahnstange des Lenksystems anliegende Unterstützungsmoment zu berechnen, müssen die dynamischen Vorgänge sowie die Reibungsverluste der gesamten Antriebseinheit berücksichtigt werden.

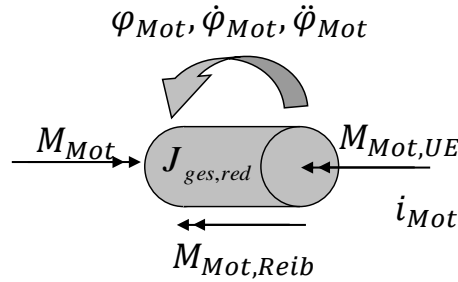


Abbildung 3.5: Modell der Antriebseinheit [Uselmann, 2012]

Zur Berechnung dieser Einflüsse wird ein Modell nach Abbildung 3.5 verwendet. In dieser Betrachtung werden der Motor sowie das Übersetzungsgetriebe zu einem Element mit einem Gesamt-Trägheitsmoment $J_{ges,red}$ auf der Motorachse zusammengefasst. Unter Berücksichtigung der relevanten Momente kann die folgende Differentialgleichung aufgestellt werden

$$\ddot{\varphi}_{Mot} \cdot J_{ges,red} = M_{Mot} - M_{Mot,UE} - M_{Mot,Reib}. \quad (3.14)$$

Berücksichtigt werden hierbei das Trägheitsmoment $J_{ges,red}$ sowie die Gesamtreibung in Motor und Getriebe $M_{Mot,Reib}$. Die Steifigkeits- und Dämpfungseinflüsse aus dem Kugelgewindetrieb sowie dem Übersetzungsriemen werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, weil diese bei der Betrachtung des Gesamtlenksystems vernachlässigbar klein sind. Das berechnete Motormoment

wird mit dem Antriebsübersetzungsfaktor i_{Mot} in die Unterstützungskraft an der Zahnstange umgerechnet

$$F_{UE} = \frac{M_{Mot,UE}}{i_{Mot}}. \quad (3.15)$$

Der Übersetzungsfaktor i_{Mot} berücksichtigt die Übersetzung aller Getriebestufen von der Motorabtriebsachse bis zur Längsachse der Zahnstange.

3.1.2 Modellierung der Systemreibung

In einem elektromechanischen Lenksystem treten in drei Teilsystemen zu berücksichtigende Reibungseffekte auf. Einer Betrachtung bedürfen die Reibung

- in dem Übersetzungsgetriebe,
- in der Zahnstangenführung (Druckstück und Gleitlager) und
- im dem Lenkstrang (Lenksäule, Stirnwandmanschette).

Zur Beschreibung der Reibung wird in dieser Arbeit das Reibungsmodell wie in Abbildung 3.6 dargestellt verwendet.

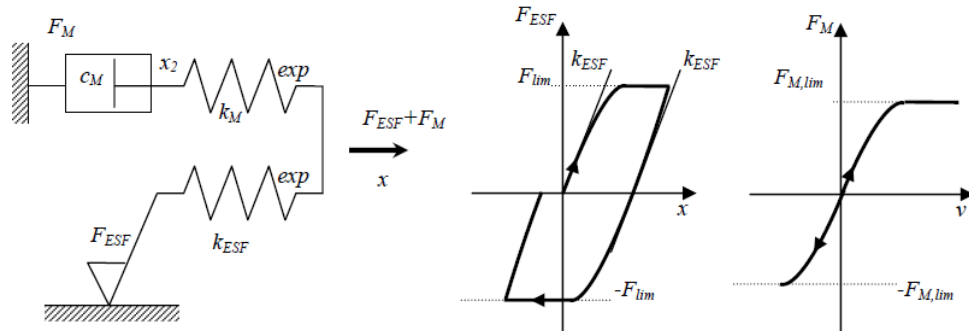


Abbildung 3.6: Reibungsmodell nach [Pfeffer u. a., 2008]

Das Modell beschreibt das Reibungsverhalten über zwei parallel geschaltete Federelemente.

Die Wegabhängigkeit wird näherungsweise durch die im Anstieg lineare Federsteifigkeit k_{ESF} beschrieben. Wie in der Hysterese zu sehen, beschreibt dieses Element den Kraftanstieg aus der Ruhelage mit der Steifigkeit k_{ESF} bis

zu der maximalen Kraft F_{lim} , bei der die Haftreibung in Gleitreibung übergeht, bei einem Richtungswechsel nimmt die Kraft mit der gleichen Steifigkeit k_{ESF} bis zum Erreichen der negativen Grundreibung ab. Die verwendete Feder hat ein exponentielles Kraftanstiegsverhalten. Dieses wird beschrieben durch:

$$F_{ESF} = F_{lim} \cdot (1 - e^{-f_{ESF} \cdot x}). \quad (3.16)$$

Der Faktor f_{ESF} kann aus der Steifigkeit bei einem entspannten Lenkgetriebe wie folgt ermittelt werden:

$$f_{ESF} = \frac{F_{lim}}{k_{ESF}}. \quad (3.17)$$

Um die dynamischen Reibungseffekte mit dem Modell abdecken zu können, kommt ein zu der Feder parallel geschaltetes Maxwell-Element zum Einsatz. Die im Maxwell-Element modellierte Feder besitzt ebenfalls wie oben beschrieben ein exponentielles Übertragungsverhalten. Sie wird eingesetzt, um die dynamischen Effekte bei hohen Geschwindigkeiten limitieren zu können. Der Dämpfer mit der Dämpfungskonstante c_M übernimmt die Aufgabe, die auf das Maxwell-Element wirkende Kraft F_M bei niedrigen Geschwindigkeiten herunterzusetzen. Der geschwindigkeitsabhängige Verlauf der Maxwellkraft ist im rechten Diagramm der Abbildung 3.6 dargestellt. Diese Kraft wird durch den Parameter $F_{M,lim}$ begrenzt.

Die gesamte Reibungskraft setzt sich in dem Modell aus den beiden Kräften F_{ESF} und F_M zusammen.

Parametrierung des Reibungsmodells

Als wichtigster Parameter für das Reibungsmodell gilt die Grundreibung $F_{FR,max}$. Diese setzt sich modellintern aus den beiden begrenzenden Kräften F_{lim} und $F_{M,lim}$ zusammen. Die Ermittlung der Grundreibung erfolgt gemäß [Pfeffer u. a., 2008]:

$$F_{FR,max} = F_{FR,stat} \cdot (1 + \frac{\Delta F_R}{F_{FR,stat}} \cdot (1 - e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot (\dot{x})^{1,7}})). \quad (3.18)$$

Zur Bestimmung der Faktoren $F_{R,stat}$ und ΔF_R werden am Lenkgetriebe definierte Durchschiebetests durchgeführt. Bei diesen Tests muss das Lenkgetriebe in einen Modus gebracht werden, bei dem der Unterstützungsmotor keine Momente auf die Zahnstange überträgt. Er wird mit einem Leerlaufstrom

von ca. 0,3 Ampere beaufschlagt, um die Induktionseinflüsse der Permanentmagnete zu beseitigen. Die Lenksäule inklusive der Lenkzwischenwelle wird abmontiert, sodass das Ritzel sich frei bewegen kann.

Die Durchschiebeversuche werden mit konstanten vordefinierten Geschwindigkeiten (5, 10, 15, 20...165 mm/sec) durchgeführt. Die Zahnstange wird dabei bis zu den Endanschlägen durchgeschoben und die dabei vorherrschenden Spurstangenkräfte mit den Kraftmessdosen an den Linearaktuatoren aufgezeichnet.

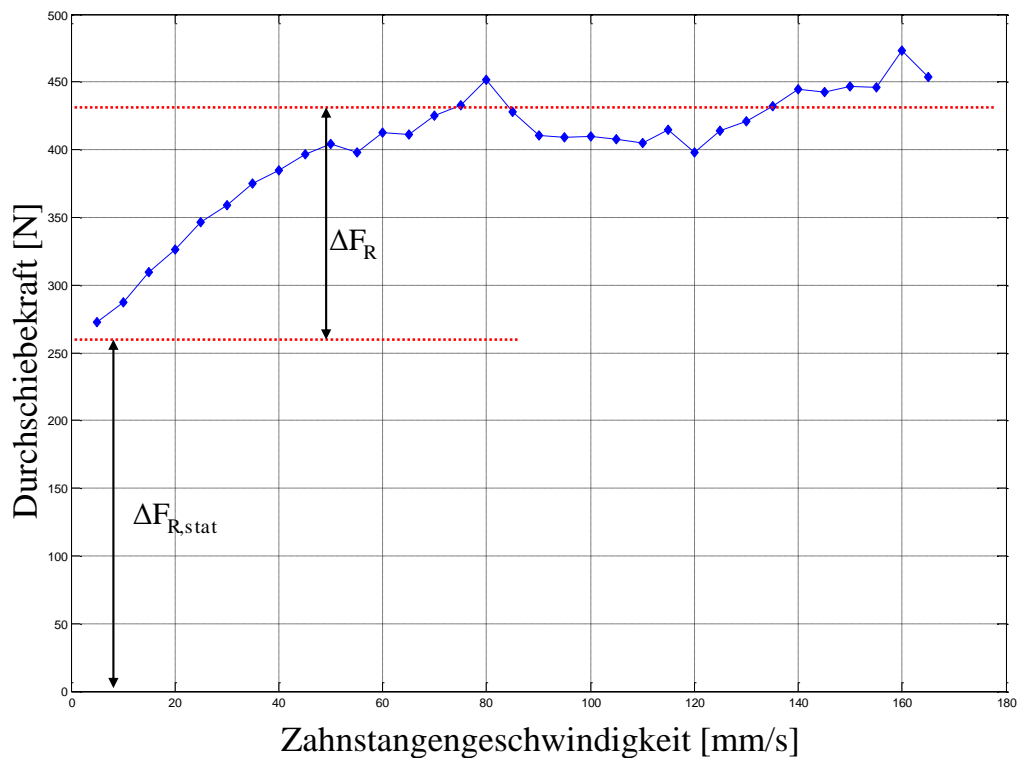


Abbildung 3.7: Systemreibung über Zahnstangengeschwindigkeit

Die Auswertung der Messungen ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Aus der Gesamtheit der Versuche werden die durchschnittlichen Zahnstangenkräfte bei einer Verschiebung nach rechts und nach links ermittelt. Der gemittelte Wert aus den beiden Kräften wird danach über der jeweiligen, dazugehörigen Verschiebegeschwindigkeit aufgetragen. Als Ergebnis resultiert eine Kurve mit einem degressiven Verlauf über der Zahnstangengeschwindigkeit.

Der Faktor $F_{R,stat}$ wird durch die Extrapolation der Kurve hin zu der Verschiebegeschwindigkeit von 0 mm/s bestimmt. Dieser beträgt bei dem getes-

teten Lenkgetriebe 260 N.

Man erkennt in der Auswertung, dass die Durchschiebekräfte in Richtung höherer Geschwindigkeiten gegen einen mittleren Wert von ca. 430 N konvergieren. Aus der Differenz dieser Kraft und dem $F_{R,stat}$ resultiert der Parameter ΔF_R . Durch Einsetzen der ermittelten Faktoren in die obere Gleichung wird die im Modell verwendete Grundreibung des Systems berechnet.

Die restlichen Parameter k_{ESF} , k_M und c_M für das Reibungsmodell werden in einem Optimierungsprozess am Rechner so eingestellt, dass die simulierten Zahnstangenkräfte mit den Zahnstangenkräften aus Aufzeichnungen so gut wie möglich übereinstimmen. Dazu werden vordefinierte Durchschiebe- und Durchlenkmanöver bei ausgeschalteter Unterstützungseinheit am Prüfstand nachgefahren.

3.2 Simulation des System Übertragungsverhaltens

Zur Darstellung des Übertragungsverhaltens in der Simulation wird ein Schwingungsmodell, wie in Abbildung 3.8, aufgebaut, das zusätzlich zu dem bereits beschriebenen mechanischen Modell die elastisch gelagerte Antriebseinheit des Lenksystems beinhaltet.

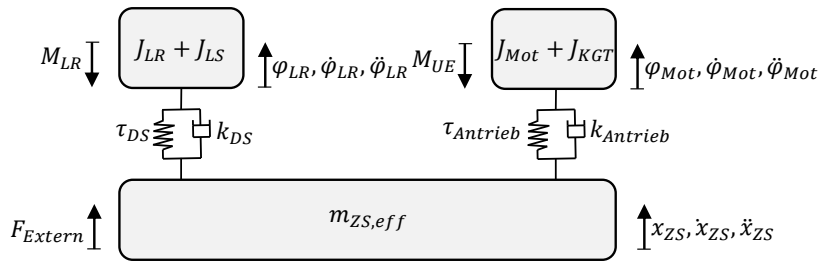


Abbildung 3.8: Schwingungsmodell EPS

Dieses Modell kann zur Erstausslegung des Gesamtsystems dienen sowie zur Beurteilung der Systemstabilität während der Reglersynthese benutzt werden. Betrachtet wird in der Simulation das Übertragungsverhalten mit den jeweiligen Eigenfrequenzen. Das Systemverhalten wird bis zu einer Frequenz von 30 Hertz untersucht. Als mechanische Auslegungsparameter können die Drehstabsteifigkeit τ_{DS} sowie die Steifigkeit der Antriebseinheit $\tau_{Antrieb}$ anhand der Simulationsergebnisse festgelegt werden.

Das Modell stellt ein schwingfähiges System mit drei Massen dar. Alle äußeren Kräfte werden über die Zahnstange in das System übertragen.

In der Simulation bezeichnet der Parameter $m_{ZS,eff}$ alle mit der Zahnstangenbewegung beschleunigten Massen. Das nächste Teilsystem stellt die Antriebseinheit dar. Dieses besteht in der Regel aus dem Rotor sowie dem Getriebe. Die Bestandteile des Getriebes sind je nach mechanischem Konzept unterschiedlich und werden in der Massenträgheit $J_{Mot} + J_{Antrieb}$ und der Übersetzung $i_{Antrieb}$ entsprechend berücksichtigt. Als letzte schwingungsfähige Masse wird in dem Modell der über den Drehstab angebundene Lenkstrang inklusive Lenkrad betrachtet.

Der dämpfende Einfluss des Fahrers wird vorerst vernachlässigt. Ebenso bleiben in der Untersuchung des dynamischen Übertragungsverhaltens die Zahnstangen- sowie die Antriebsreibung unberücksichtigt.

Zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens werden zunächst die, das Modell beschreibenden, Differentialgleichungen in die Zustandsraumdarstellung überführt. Das Zustandsraummodell wird durch zwei Gleichungen beschrieben, die Zustandsdifferentialgleichung 3.19 und die Ausgangsgleichung 3.20

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t), \quad (3.19)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t). \quad (3.20)$$

Bei den Variablen handelt es sich um den Zustandsvektor $\mathbf{x}(t)$, der aus allen modellierten Systemzuständen aufgebaut ist und um den Eingangsvektor $\mathbf{u}(t)$, der alle Systemeingänge in der Differentialgleichung berücksichtigt. Der Aufbau dieser Vektoren für das modellierte Lenksystem ist in der Gleichung 3.21 dargestellt

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{LR} \\ \dot{x}_{ZS} \\ \dot{\varphi}_{Mot} \\ \varphi_{LR} \\ x_{ZS} \\ \varphi_{Mot} \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} M_{LR} \\ F_{Extern} \\ M_{Mot} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Nachdem diese Vektoren festgelegt sind, können die Systemgleichungen in die Form der Gleichung 3.19 gebracht werden. Die Systemmatrix \mathbf{A} und die Eingangsmatrix \mathbf{B} werden entsprechend extrahiert. Für das in Abbildung 3.8 aufgestellte Modell mit den entsprechenden Parametern werden Differential-

gleichungen aufgestellt und anschließend in Form der Matrizen **A** und **B** in den Gleichungen 3.22 und 3.23 dargestellt.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{k_{DS}+k_{LR}}{J_{LR}} & \frac{i_{DS} \cdot k_{DS}}{J_{LR}} & 0 \\ \frac{i_{DS} \cdot k_{DS}}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} & -\frac{k_{DS} \cdot i_{DS}^2}{2 \cdot \pi} + \frac{k_{Antrieb} \cdot i_{KGT}^2}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} & \frac{i_{KGT} \cdot k_{Antrieb}}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} \\ 0 & \frac{i_{KGT} \cdot k_{Antrieb}}{J_{Mot}} & -\frac{k_{Antrieb}}{J_{Mot}} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\tau_{DS}}{J_{LR}} & \frac{i_{DS} \cdot \tau_{DS}}{J_{LR}} & 0 \\ \frac{i_{DS} \cdot \tau_{DS}}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} & -\frac{\tau_{DS} \cdot i_{DS}^2}{2 \cdot \pi} + \frac{\tau_{Antrieb} \cdot i_{KGT}^2}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} & \frac{i_{KGT} \cdot \tau_{Antrieb}}{2 \cdot \pi \cdot m_{ZS}} \\ 0 & \frac{i_{KGT} \cdot \tau_{Antrieb}}{J_{Mot}} & -\frac{\tau_{Antrieb}}{J_{Mot}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{ZS}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J_{Mot}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Mit der Systemdifferentialgleichung ist es möglich, das Modell unter Variation der Eingänge beliebig zu manipulieren und das Systemverhalten in den Zuständen zu untersuchen.

Zur Beschreibung der Systemantwort auf definierte Eingänge bezüglich der Amplitudenverstärkung und des Phasenverhaltens wird die Ausgangsgleichung 3.20 aufgestellt. Die Matrizen **C** und **D** werden so aufgebaut, dass der Ausgangsvektor $\mathbf{y}(t)$ die Übertragungsfunktionen zu den definierten Zuständen enthält.

Zur Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens wird die Übertragungsdynamik von äußerer Anregung der Zahnstange zum Drehstabsmoment betrachtet:

$$G = \frac{y(t)}{u(t)}. \quad (3.24)$$

Das Drehstabmoment bildet sich aus der Drehstabsteifigkeit τ_{DS} im Produkt mit der Winkeldifferenz zwischen dem Lenkradwinkel und dem auf den Ritzelwinkel übersetzten Zahnstangenweg. Die Gleichung

$$y(t) = -\frac{i_{DS}}{2 \cdot \pi} \cdot \tau_{DS} \cdot x_{ZS}(t) + \frac{i_{DS}^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tau_{DS} \cdot \varphi_{LR}(t) \quad (3.25)$$

bildet diesen Zusammenhang ab. Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen Ein- und Ausgang wird das Drehstabmoment in die Zahnstangenkraft übersetzt. Die Dämpfung im Drehstab wird für diese Untersuchung vernachlässigt.

Als Eingang wird die externe Kraft

$$u(t) = F_{extern}(t). \quad (3.26)$$

festgelegt.

Werden die beiden Gleichungen für den Eingangs- und Ausgangsvektor in die Form der Ausgangsmatrix gebracht, lassen sich unten abgebildeten Matrizen **C** und **D** darstellen. Die Matrix **D** ist eine Nullmatrix, da für den Ausgangsvektor die Eingangsgrößen keine Relevanz haben.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{i_{DS}}{2 \cdot \pi} \cdot \tau_{DS} & \frac{i_{DS}^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tau_{DS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Nachdem die Matrizen für das Zustandsraummodell festgelegt sind, ist es möglich, die Übertragungsfunktionen zwischen Eingängen und definierten Ausgängen zu berechnen. Zunächst wird an der Zustandsdifferential- und der Ausgangsgleichung eine Laplace-Transformation durchgeführt:

$$s \cdot \mathbf{X}(s) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(s) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(s), \quad (3.28)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}(s) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}(s). \quad (3.29)$$

Die Gleichung 3.28 wird nach $\mathbf{X}(s)$ aufgelöst

$$\mathbf{X}(s) = (s \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(s) \quad (3.30)$$

und anschließend in 3.29 eingesetzt.

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C} \cdot (s \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(s) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}(s). \quad (3.31)$$

Mit dieser Umformung ist es nun gemäß

$$G(s) = \frac{\mathbf{Y}(s)}{\mathbf{U}(s)} = \mathbf{C} \cdot (s \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (3.32)$$

möglich, das Übertragungsverhalten zu berechnen.

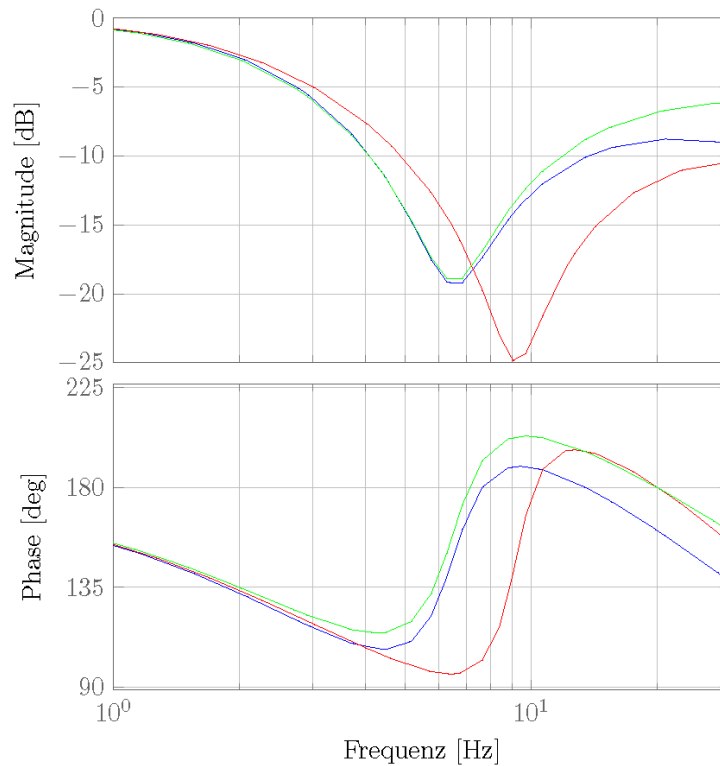


Abbildung 3.9: Übertragungsverhalten des passiven EPS-Systems (blau: Referenzsystem, rot: dreifache Servosteifigkeit, grün: doppelte Drehstabsteifigkeit)

In Abbildung 3.9 ist das Bode-Diagramm mit den drei unterschiedlichen Übertragungsverhalten zwischen der externen Anregung und dem Drehstabsmoment dargestellt. Zu sehen sind die Amplitudenverstärkung sowie der Phasengang in einem Frequenzbereich bis 30 Hz.

In dem Bodediagramm wird exemplarisch der Einfluss der Steifigkeiten aus dem Drehstab und aus der Servoanbindung auf das System-Übertragungsverhalten dargestellt. Es wird erkennbar, dass die Steifigkeit der Servoeinheit ein wichtiger Faktor bei der Festlegung der Tilgungsfrequenz in dem relevanten Frequenzbereich des Gesamtsystems ist.

Das Diagramm macht deutlich, dass über eine einfache Anpassung der Systemmatrix **A** erste Aussagen über den Einfluss einzelner Parameter auf das Gesamtsystem getätigt werden können.

Mit den Systemmatrizen **A** und **B** ist es ebenfalls möglich, effizient modulare Simulationsmodelle aufzubauen und somit das Verhalten interner Zustände bei unterschiedlichen Anregungen simulativ zu untersuchen.

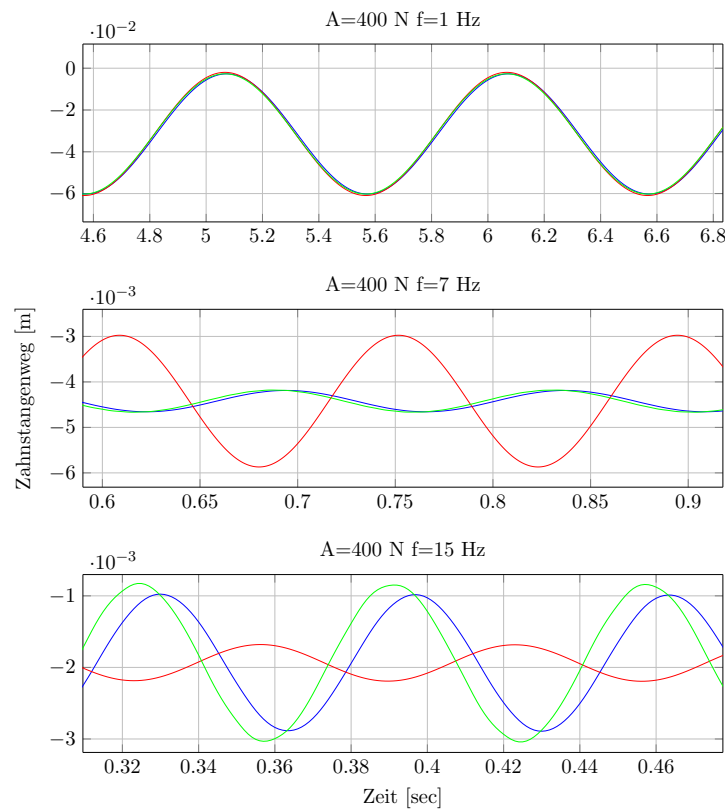


Abbildung 3.10: Dynamische Systemzustände bei 1, 7, 15 Hz Anregung (blau: Lenkwinkel, rot: Rotorlage, grün: Zahnstangenweg)

In Abbildung 3.10 sind die Ergebnisse einer solchen Simulation zusammengestellt. Das System wird hierbei durch eine externe Kraft mit der Amplitude von 400 N und ausgewählten Frequenzen (1, 7, 15 Hz) von außen an der

Zahnstange angeregt. Untersucht werden hierbei die Bewegungen der einzelnen Massen bei Anregungen mit einer Frequenz unterhalb der Systemeigenfrequenz, im Bereich der Eigenfrequenz und oberhalb der Eckfrequenz. Diese liegt beim Referenzlenksystem bei circa 7 Hz.

In der oberen Darstellung wird das System bei einer Frequenz von 1 Hz angeregt. Die Anregung erfolgt in einem Bereich weit unterhalb der Eigenfrequenz, die angeregten Teilsysteme weisen weder Phasenverschiebungen zueinander noch eine dynamische Verstärkung bzw. Abschwächung der Amplituden auf.

Bei einer Anregung mit der Systemeigenfrequenz ist erkennbar, dass die Zahnstange und der Lenkradwinkel keine Unterschiede in der Dynamik aufzeigen. Der Rotor schwingt dabei phasenverschoben und mit einer überhöhten Amplitude.

In der untersten Darstellung wird die starke Dämpfung im EPS-Antrieb bei einer Anregung bei 15 Hz ersichtlich. Die Zahnstange und das Lenkrad schwingen hierbei gegenphasig.

3.2.1 Lenksystem Prüfstand

Um die zuvor vorgestellten Simulationen zu validieren sowie weitere in dieser Arbeit beschriebenen hochdynamischen Untersuchungen an einem mechanischen Lenksystem durchführen zu können, wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten ein Lenksystem HIL-Prüfstand spezifiziert und mit der Firma dSpace GmbH entwickelt. Der Aufbau dieses Prüfstands sowie die wichtigsten Spezifikationen sind in Abbildung 3.11 verdeutlicht.

Das zu untersuchende Lenksystem wird auf der Aufspannplatte über variable Adapterplatten entsprechend der Befestigung im Fahrzeug fest in den Gummilagern verbunden. In speziellen Fällen besteht auch die Möglichkeit das Lenksystem starr anzubinden, in dem die Gummilager aus den Buchsen herausgedrückt werden.

An den Spurstangen wird das Lenksystem mit den beiden Linearmotoren verbunden.

Über spezielle Verstellelemente besteht die Möglichkeit, den Lenkstrang entsprechend der Fahrzeugeinbaulage auszurichten und das Lenksystem entweder manuell über das Lenkrad oder den angekoppelten Lenkmotor von oben anzuregen.

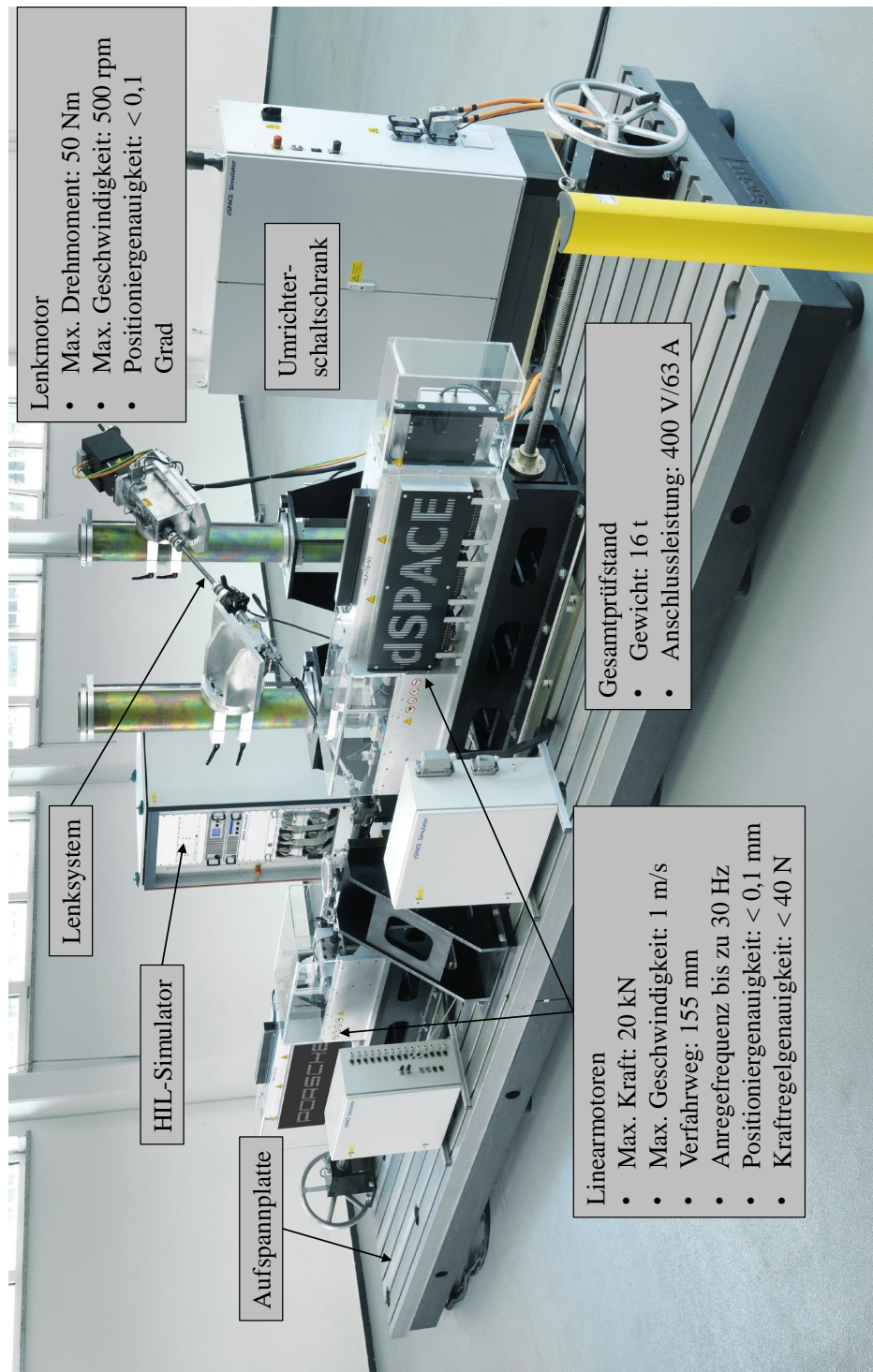


Abbildung 3.11: Porsche Lenksystem HIL-Prüfstand [Uselmann u. a., 2016]

Die Anregung des Lenksystems kann entweder über Testvektoren an den einzelnen Aktuatoren eingebracht werden oder über In-the-Loop-Fahrmanöver mittels einer Gesamtfahrzeugsimulation geschehen.

Die Anregungen sowohl über den Lenkroboter, wie auch über die Linearmotoren können in dem für Lenksysteme relevanten Frequenzbereich 0,1-30 Hz mit einer hohen Regelungsgenauigkeit umgesetzt werden.

3.2.2 Dynamisches Verhalten der Servoeinheit

Nachdem Aussagen über das Übertragungsverhalten des passiven Systems simulativ ermittelt werden können, ist es ebenfalls von großer Bedeutung, das dynamische Verhalten des aktiven Systems zu betrachten.

Die Servoeinheit stellt in der Regel in Abhängigkeit von intern messbaren Systemzuständen Unterstützungskräfte an die Zahnstange. Die tatsächlich gestellten Kräfte weichen über den Frequenzbereich sowohl in der Phase wie auch in der Amplitude von den berechneten Soll-Servokräften teilweise deutlich ab. Es ist demnach zu empfehlen, dieses Übertragungsverhalten bereits in der internen Berechnung der Soll-Kräfte zu berücksichtigen, um das gewünschte Systemverhalten tatsächlich erreichen zu können.

Für die Dynamik und Kraftübertragung des EPS-Unterstützungsmotors sind sowohl der mechanische Aufbau des Motors, das Übersetzungsgetriebe mit den Steifigkeiten und Spielen, als auch die intern integrierte Sollmomentenregelung verantwortlich. Der Zugriff auf den Algorithmus der internen Motorregelung ist in der Praxis oft nicht vorhanden, da diese Software-Komponente einen Bestandteil der Basissoftware darstellt und somit dem Know-How-Schutz des Motorlieferanten unterliegt. Es ist allerdings durchaus möglich, die benötigte Übertragungsfunktion an einem Lenksystemprüfstand zu ermitteln. Es werden im folgenden zwei Versuchsaufbauten, die jeweils in gleicher Güte zur Systemübertragung führen, näher vorgestellt.

Existiert für das zu untersuchende Lenksystem eine Sondersoftware mit der Möglichkeit dem Motor beliebige Sollmomente vorzugeben, so kann der Versuch wie in Abbildung 3.12 dargestellt, aufgebaut werden.

Das Lenksystem wird fest auf der Prüfstandsplatte montiert, zusätzlich wird das Lenksystem an einem Außengelenk mithilfe eines Winkels gegen Verschiebung fixiert. Zwischen der Fixierung und der Zahnstange muss zur Messung der axialen Zahnstangenkräfte eine Kraftmessdose implementiert oder das Außengelenk mit Dehnungsmessstreifen versehen werden.

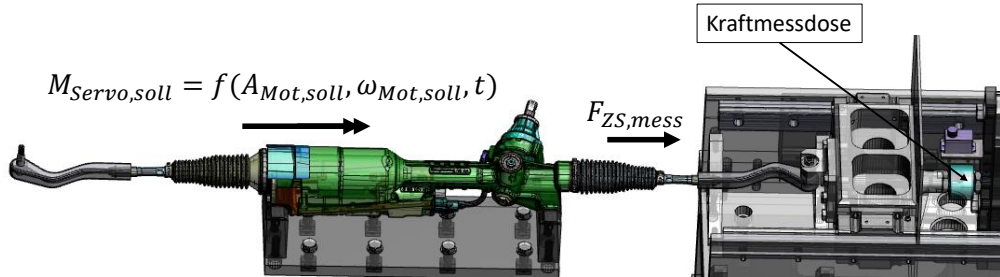


Abbildung 3.12: Prüfstands Aufbau Vermessung EPS-Antrieb

Der Servoeinheit wird ein Sinus-Sweep im Frequenzbereich von 0,5 bis 30 Hz mit einer bestimmten Amplitude als zu stellendes Sollmoment vorgegeben. Alle zusätzlichen Funktionen in der EPS-Software werden für den Versuch über Applikation abgeschaltet. Die gemessenen Kräfte aus der Kraftmessdose oder der Messspurstange werden als Ausgangsgröße synchron zum Soll-Unterstützungsmoment aufgezeichnet.

Falls keine solche Sondersoftware für das Lenksystem zur Verfügung steht, muss dem Motor die definierte Sollkraft über die Beeinflussung der internen Systemzustände aufgeprägt werden. Dazu wird die Funktionssoftware auf lineare Zusammenhänge zwischen dem Motor-Sollmoment und einer intern gemessenen Größe untersucht. Alle übrigen Funktionalitäten in der EPS werden abgestellt.

Ein solcher Zusammenhang in der Software des Referenzsystems ist der Aufbau der Grundunterstützungskraft

$$F_{soll,GU} = f(M_{DS}, v_{Fzg}). \quad (3.33)$$

Hier wird die Servokraft des Motors in Abhängigkeit vom gemessenen Handmoment und der Fahrzeuggeschwindigkeit angefordert.

Es besteht demnach in dieser Funktion eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Servomoment und dem gemessenen Drehstabmoment. Der Prüfstands-aufbau für die Servo-Manipulation unter Ausnutzung dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

Zusätzlich zu dem beschriebenen Aufbau wird das Lenksystem über den Lenkstrang mit einem Lenkaktuator verbunden. Der Lenkroboter bekommt als Stellvektor einen Lenkwinkel-Sweep mit fester Amplitude und einem Frequenzspektrum von 0,5 bis 30 Hz übergeben. Durch gezielte Parametrierung des Lenksystems stellt das Modul für die Grundunterstützung eine zum Dreh-

stabsmoment lineare Kraft

$$F_{Mot,soll} = F_{GU,soll} = a_{GU} \cdot M_{DS}. \quad (3.34)$$

Alle restlichen Funktionen werden deaktiviert.

Gemessen werden bei dem Versuch das Drehstabsmoment, das interne Motor-Sollmoment und die an der Zahnstange anliegende Kraft.

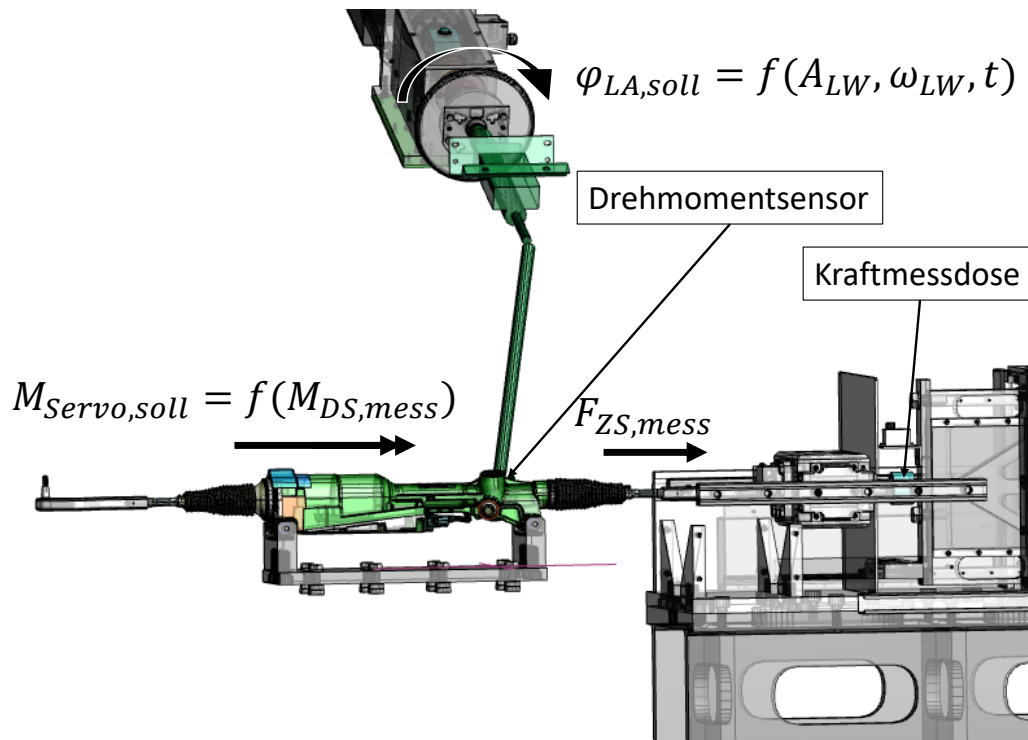


Abbildung 3.13: Prüfstands Aufbau Vermessung EPS-Antrieb mit Lenkaktuators

Weil in dieser Messung das Drehstabsmoment ebenfalls einen Anteil zu der Gesamtzahnstangenkraft leistet, muss die gemessene Zahnstangekraft um diesen Beitrag korrigiert werden, um die direkte Übertragung des Motormoments in die Zahnstangenkraft zu untersuchen. Die Übertragungsfunktion für die Servoeinheit lautet demnach

$$G = \frac{Y}{U} = \frac{F_{ZS,mess} - M_{DS} \cdot i_{DS}}{F_{Mot,soll}}. \quad (3.35)$$

In beiden Prüfstands aufbauten ist das Lenksystem gegen eine axiale Verschiebung der Zahnstange fixiert, auf dieser Grundlage können alle dynamischen

Einflüsse aus der Zahnstange und dem Rotor inklusive Getriebe für die Übertragungsfunktion vernachlässigt werden.

In der Abbildung 3.14 sind die Übertragungsverläufe unterschiedlicher Motorbaustände in einem Bode-Diagramm dargestellt.

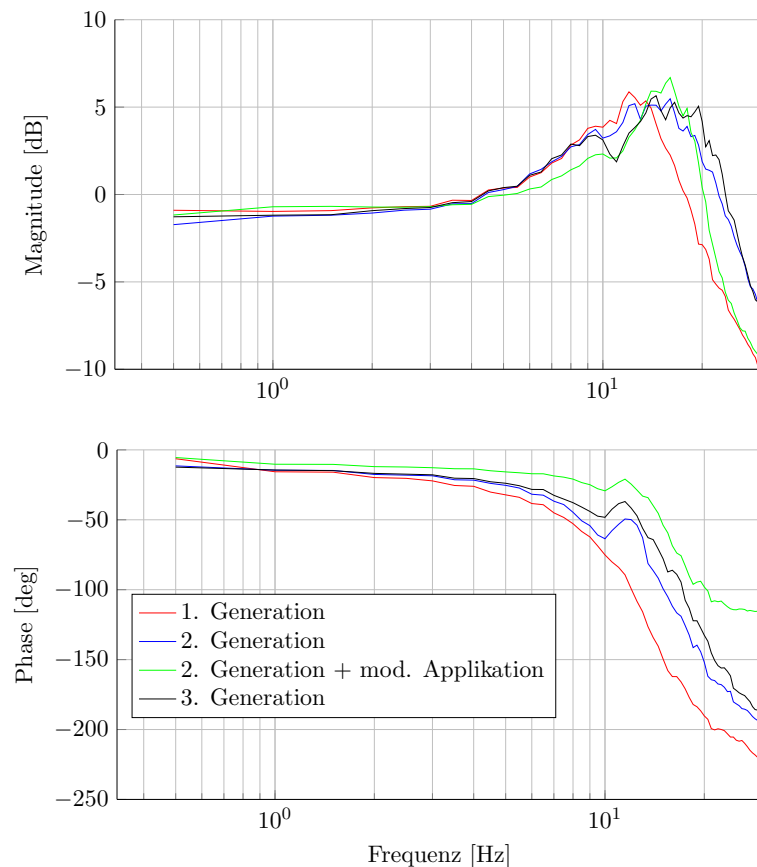


Abbildung 3.14: Motorübertragungsverhalten über Entwicklungsstufen

Bei den Versuchen wird über den Lenkaktuator ein Sinusweep mit einer Lenkwinkel-Amplitude von 1 Grad und Frequenzen von 0,5 bis 30 Hz in verschiedene Lenksysteme eingeleitet. Verglichen werden Anpassungen zwischen den einzelnen Entwicklungsstufen (Gen. 1 - 3) mit Optimierungsmaßnahmen in Motor-Hardware, -Ansteuerung und der internen Momentenregelung. Das mechanische Konzept der Lenksysteme ist identisch.

In der zweiten Generation der Antriebseinheit wird ein neuer Prozessor verbaut. Die Basis-Software wird aus der ersten Generation übernommen. Die deutliche Phasenreduktion und Anhebung des Amplitudengangs im Frequenzbereich größer als 15 Hz, zeigt die Verbesserung in der Stellgenauigkeit des

Motors durch ein Update des Steuergerätes auf.

Im nächsten Baustand (2. Generation mit modifizierter Applikation) wird nur eine Optimierung in der Applikation der internen Motoransteuerung durchgeführt. Die Messung zeigt bereits hier eine weitere Anhebung des Phasenverhaltens bei hohen Stellfrequenzen.

Die letzte Entwicklungsstufe (3. Generation) zeigt eine weitere Verbesserung des Übertragungsverlaufs. Hier wurde der optimale Kompromiss zwischen einer ausreichenden Phasenreserve zu höheren Frequenzen und gleichzeitig hoher Amplitudenverstärkung in den relevanten Frequenzbereichen.

Die in dem Beispiel gezeigten Veränderungen in der Motorstellgenauigkeit haben einen starken Einfluss auf das haptische Verhalten des Lenksystems im Fahrzeug. Allein durch die Veränderung der Applikation in der Motoransteuerung, ergeben sich deutliche Unterschiede in der Wahrnehmung des Fahrers bei gleicher Parametrierung aller Lenkfunktionen auf dem Software-High-Level (SW-HL). Dies macht deutlich, dass die Berücksichtigung des Motor-Stellverhaltens in der Funktionssoftware die Lenkgefühl-Applikation unempfindlicher gegen Anpassungen in der Basis-SW macht und somit den Applikationsaufwand deutlich reduzieren kann.

3.3 Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

Das Führen eines Fahrzeugs durch einen Fahrer kann als Regeln der fahrdynamischen Größen des Fahrzeugs anhand eines Fahrkurses aufgefasst werden. Der Fahrer fungiert hierbei gleichzeitig als Regler, Steller, Sensor und Filter [Lunkeit, 2014].

Wie ein solcher Regelkreis aufgebaut ist, verdeutlicht die Abbildung 3.15. Bei dieser Regelung wird das Fahrzeug als Regelstrecke, das Lenkrad als Aktor und der Mensch als Regler verstanden.

Die Regeldifferenz, welche durch den Fahrer ausgeregelt werden soll, bildet sich aus der Abweichung des Straßenverlaufs vom gewünschten Fahrkurs (Regelgröße). Um diese Aufgabe bestmöglich zu bewerkstelligen, stehen dem Fahrer mehrere Sensoren zu Verfügung. Diese sind optischer, haptischer, akustischer sowie kinästhetischer Natur. Die dazugehörigen Informationen bekommt der Fahrer aus dem Fahrzeug, der Fahrzeugumgebung sowie über das Lenksystem [Schramm u. a., 2016].

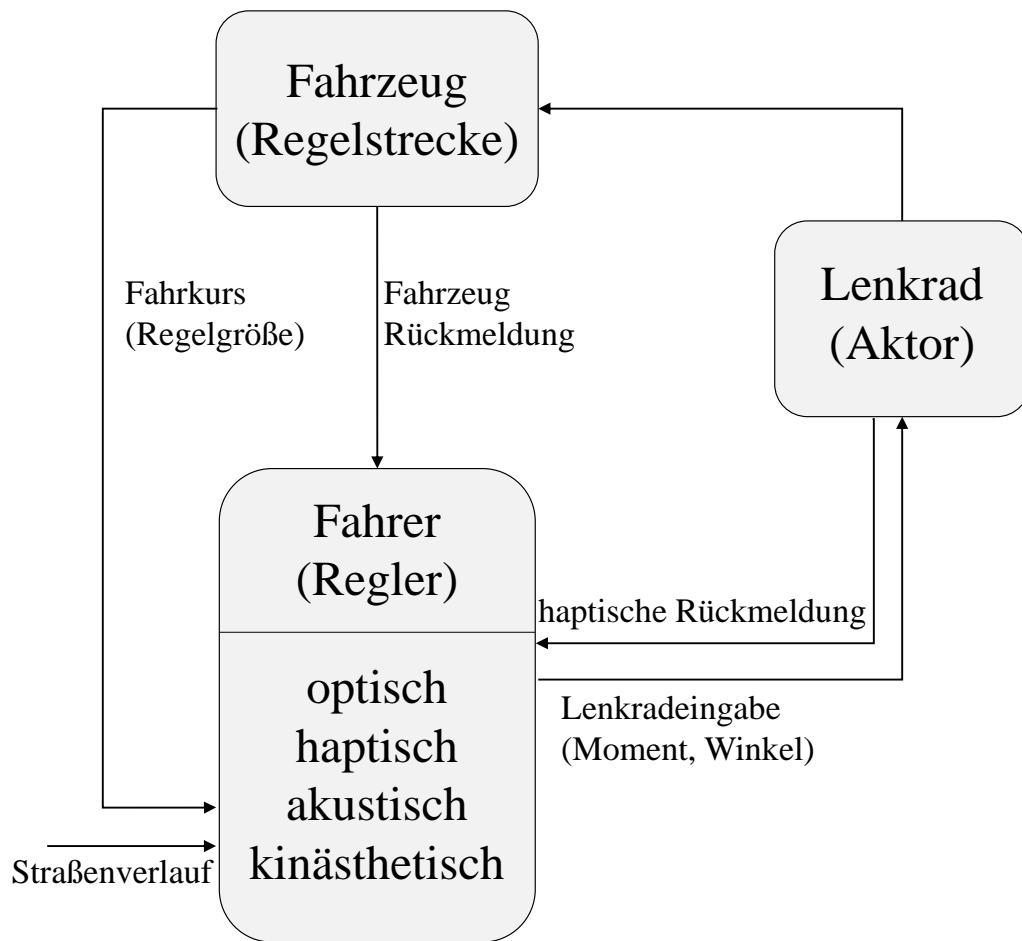


Abbildung 3.15: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis [Pfeffer u. Harrer, 2013]

Auf Grundlage dieser Informationen stellt der Fahrer mit Hilfe seines Wissens und seiner Erfahrung über die Regelstrecke den Solllenkwinkel, welcher über eine unterlagerte Regelung durch das Lenksystem und das Fahrwerk umgesetzt wird. Nicht mehr kontrollierbare Fahrzeugzustände bei dieser Regelung können sowohl durch das Verschätzen des Fahrers, als auch durch fehlerhafte Informationen aus dem Lenksystem, dem Fahrzeug oder der Umwelt entstehen. Somit ist es von immenser Bedeutung, das Systemverhalten der Regelstrecke, also des Fahrzeugs mit dem Lenksystem so plausibel und linear wie möglich zu gestalten und dem Fahrer alle vorhandenen Informationen in der notwendigen Höhe und Phasenrichtigkeit zukommen zu lassen.

Das Lenksystem übernimmt bei dieser Regelungsaufgabe zwei wichtige Funktionen, aus welchen sich die entsprechenden Hauptanforderungen bilden. Zum Einen agiert die Lenkvorrichtung als Steller mit einem eigenen Übertragungs-

verhalten. Bei dieser Aufgabe kommt es auf die notwendige Stelldynamik der Unterstützungseinheit an. Zum Anderen muss das Lenksystem dem Fahrer alle zur Regelung notwendigen Informationen aus der Fahrbahn plausibel, zeitnah und in richtiger Höhe zu Verfügung stellen. Hieraus bilden sich Anforderungen an eine Lenkung bezüglich Bereitstellung des plausiblen Lenkgefühls sowie der richtigen Rückmeldung.

Kapitel 4

Anforderungen an ein Lenksystem

4.1 Grundanforderungen

Funktionale Anforderungen an ein Lenksystem lassen sich hauptsächlich aus Grundanforderungen an eine Lenkvorrichtung aus Kundensicht extrahieren. Diese Anforderungen unterscheiden sich in ihrer Gewichtung und Priorität in Abhängigkeit von dem jeweiligen Einsatzbereich, sprich dem Fahrzeugkonzept.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grundanforderungen in drei Hauptkategorien unterteilt, welche im Folgenden für die funktionale Ausprägung des Systems in sportlichen Fahrzeugkonzepten relevant sind. Diese Bereiche sind:

- Lenkgefühl,
- Sportlichkeit und
- Betriebssicherheit.

Diese Grundbestandteile eines Lenksystems werden in ähnlicher Weise auch in [Pfeffer u. Harrer, 2013] und [Reimpell, 1984] diskutiert.

In dieser Arbeit wird die Anforderung an die Sportlichkeit des Lenksystems unter einem besonderen Augenmerk betrachtet, obwohl bei vielen aktuell auf dem Markt befindlichen und zukünftigen Fahrzeugkonzepten dem Aspekt eines natürlichen, transparenten und sportlichen Lenksystems eine niedrigere Relevanz als der Steigerung des Komforts bzw. der Funktionalität zugewiesen

wird. Auch in zukünftigen Konzepten wie Steer-by-Wire oder Lenksystemen mit alternativen Bedienkonzepten werden diese Anforderungen an das Lenksystem aufgrund der höheren Priorisierung des pilotierten Fahrens nur eine untergeordnete Priorität besitzen.

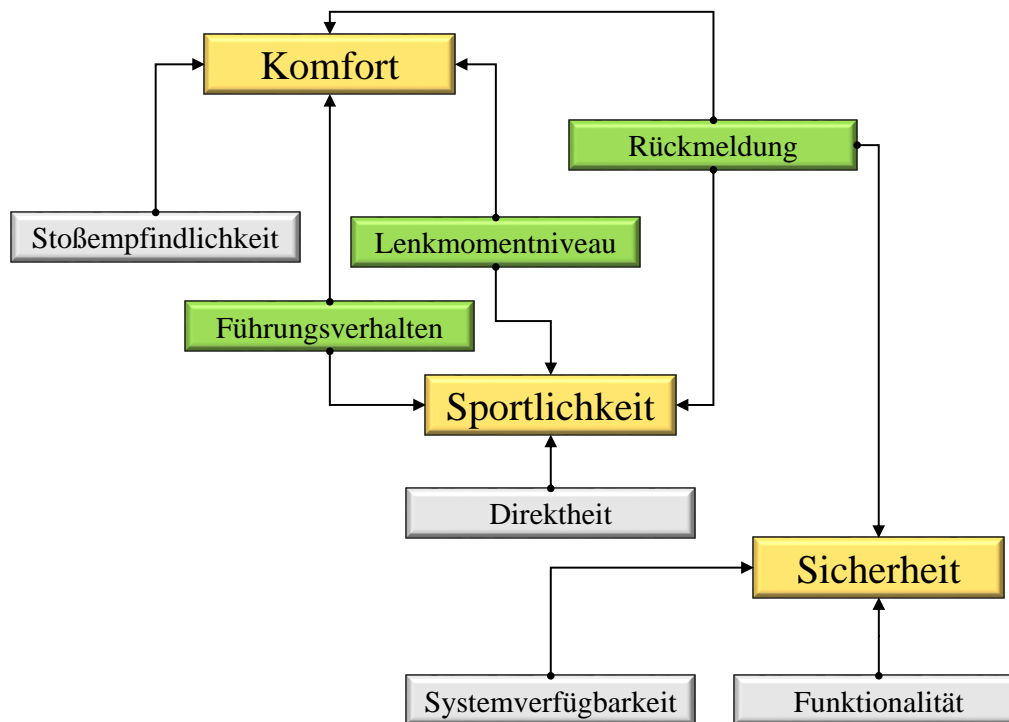


Abbildung 4.1: Zusammenhang der Grundanforderungen an Lenksysteme

Werden diese einzelnen Bereiche unter funktionalen Aspekten näher betrachtet so können weitere Unterkategorien identifiziert werden. Zu diesen zählen

- Stoßempfindlichkeit,
- Lenkmomentniveau,
- Führungsverhalten,
- Direktheit,
- Funktionalität,
- Systemverfügbarkeit sowie
- Rückmeldung und Transparenz.

In Abbildung 4.1 wird die Einflussnahme dieser Unterkategorien auf die aufgestellten Grundanforderungen verdeutlicht.

In gelben Kästen sind die Grundanforderungen aufgeführt. In den kleineren grauen und grünen Kästen sind die Eigenschaften eines Lenksystems dargestellt, die diese umfassenden Anforderungen beeinflussen. Die mit grün hinterlegten Merkmale haben gleichzeitigen Einfluss auf mehrere Grundanforderungen und bedürfen einer besonderen Auseinandersetzung bei der Charakterisierung eines Lenksystems. Die Systemeigenschaften werden im Folgenden genauer diskutiert.

Komfort

In der Darstellung wird ersichtlich, welche Bereiche eine Grundanforderung beschreiben. So wird ein Lenksystem als komfortabel empfunden, wenn nur wenig Fahrerkraft aufgewendet werden muss, um das Fahrzeug zu rangieren.

Des Weiteren senken niederfrequente Stöße mit hohen Amplituden das Komfortniveau eines Lenksystems erheblich ab. Die Lenkungsstößigkeit ist ein Maß für die Empfindlichkeit von Lenkungen auf vertikale Einzelanregungen [Schimmel, 2010].

Das Führungsverhalten beschreibt das Ansprechen des Fahrzeug auf Lenkwinkeländerungen. Spricht das Fahrzeug allerdings zu direkt an, so wird das Lenkverhalten bzw. das Fahrverhalten als zu nervös beurteilt.

Die letzte Einflussgröße auf den Lenkkomfort stellt das Rückmeldeverhalten des Lenksystems dar. Teilt das Lenksystem die Änderungen des Rad-Straße-Kontakts zu stark mit, zum Beispiel bei plötzlichen Reibwertänderungen in der Fahrbahn oder bei sich ändernden Schlupfzuständen an der angetriebenen Achse, so kann das bei dem Fahrzeugführenden ein Unwohl-Empfinden auslösen, da er diese Informationen nicht direkt interpretieren kann und von diesen in gewissem Maße überrascht wird.

Sportlichkeit

Das Maß der Sportlichkeit eines Lenksystems hängt, wie in der oberen Abbildung 4.1 dargestellt, von folgenden vier Eigenschaften ab:

- Lenkmomentniveau,
- Führungsverhalten,

- Direktheit und
- Rückmeldung.

Das Grundlenkmoment darf bei sportlichen Lenksystemen nicht zu niedrig sein, weil durch das zu hohe Maß an Unterstützungskraft die informationsbehafteten Lenkmomentschwankungen prozentual nur noch einen kleinen Anteil darstellen und so die Nutzinformationen verloren gehen. Einen weiteren Grund für höhere Handmomente in sportlichen Fahrzeugen stellt die Notwendigkeit eines Abstützungsmoments in den Armen des Fahrers beim Fahren unter hohen Querbeschleunigungen dar, die vor allem im Rennstreckenbetrieb des Fahrzeugs vorkommen.

Das Führungsverhalten einer sportlichen Lenkung bedarf eines sehr spontanen Ansprechens des Fahrzeugs beim Auslenken. Das Fahrzeug muss bereits auf minimale Korrekturbewegungen im Lenkrad reagieren. Das heißt, dass die Elastizitäten im Lenkstrang so gering wie möglich gehalten werden müssen. Neben dem Ansprechverhalten ist das passende Dämpfungsmaß im Lenksystem entscheidend für ein sportliches Führungsverhalten bei hohen Lenkradwinkelgeschwindigkeiten.

Ein weiteres Kriterium für Sportlichkeit ist die gewählte Lenkübersetzung i_S , welche die Direktheit des Lenksystems bestimmt. Hierbei ist der bei der Auslegung des Gesamtfahrzeugs gewünschte Eigenlenkgradient

$$EG = \frac{d\varphi_R}{da_y} - \frac{d\varphi_{RA}}{da_y}, \quad (4.1)$$

bestimmend für das zu wählende Übersetzungsverhältnis Lenkrad- zu Radlenkwinkel

$$d\varphi_{LR} = \frac{d\varphi_R}{i_S}. \quad (4.2)$$

Die wichtigste Größe bei der Lenksystemauslegung für sportlich orientierte Fahrzeuge ist das vorhandene Maß an Transparenz und Rückmeldung des Lenksystems. Es ist von großer Bedeutung, dem Fahrer unmittelbar und in richtiger Höhe die Informationen über den fahrdynamischen Zustand des Fahrzeugs bereitzustellen. Nur so ist es möglich, das Fahrzeug am Rande des fahrdynamischen Grenzzustands sicher zu bewegen.

Sicherheit

Bei einem elektromechanischen Lenksystem handelt es sich um ein Fahrzeugsystem mit höchsten Ansprüchen an die funktionale Sicherheit. Es muss unter

allen möglichen Fehlermöglichkeiten eine sichere Querführung des Fahrzeugs garantiert sein. Um dies zu gewährleisten, existieren Entwicklungs- und Absicherungsmethoden, die in der Norm ISO26262 zusammengefasst sind. Hierbei gilt als höchstes Ziel bei der funktionalen Absicherung des Lenksystems das Vermeiden eines Blockierens im Lenksystem sowie eines selbstständigen Lenkens im Fall eines Ausfalls der Teilkomponenten oder einer Fehlfunktion in der Software.

Ein weiteres Kriterium zum Sicherstellen eines sicheren Gefühls beim Fahrzeugführer ist die höchstmögliche Systemverfügbarkeit. Es muss sichergestellt werden, dass auch bei Fehlfunktion einzelner Sensoren im Lenksystem oder im Fahrzeug die Lenkung eine plausible unterstützende Kraft bereitstellen kann.

Neben den funktionalen und technischen Sicherheitsaspekten eines Lenksystems, muss die Lenkung dem Fahrer zusätzlich durch ein Mindestmaß an Rückmeldung und Natürlichkeit ein Sicherheitsgefühl vermitteln. So müssen grundlegende Zusammenhänge wie Kraftanstieg über Querb beschleunigung oder physikalisch richtiger Rücklauf gegeben sein, um die Akzeptanz und das Wohlempfinden für das Gesamtfahrzeug beim Fahrer zu erwecken.

4.2 Charakteristische Eigenschaften eines Lenksystems

Aus der Betrachtung im vorhergehenden Kapitel haben sich Eigenschaften eines Lenksystems herauskristallisiert, die ihren Einflussbereich gleichzeitig in mehreren Grundanforderungen haben. So bestimmen das eingestellte Niveau des Lenkmoments sowie das Führungsverhalten das Empfinden des Kunden in den Bereichen des Komforts sowie der Sportlichkeit eines Fahrzeugs. Die Rückmeldung des Lenksystems beeinflusst noch zusätzlich sicherheitstechnische Aspekte in der querdynamischen Fahrzeugführung.

Diese drei Eigenschaften inklusive ihrer Anforderungen aus der Sicht des Einsatzbereichs in sportlich orientierten Fahrzeugen werden in den nächsten Abschnitten näher betrachtet.

4.2.1 Lenkmomentniveau

Laut [Pfeffer u. Harrer, 2013] stellen das Lenkmomentniveau und dessen Verlauf neben den fahrwerksabhängigen Fahrzeugreaktionen die wichtigsten

Eigenschaften zur Beeinflussung des Lenkgefühls im Fahrzeug dar. Diese werden über den haptischen Sinn wahrgenommen und somit sehr schnell im Gehirn verarbeitet.

Obwohl bereits viele Anstrengungen unternommen wurden ein plausibles und harmonisches Lenkmoment unter theoretischen Gesichtspunkten zu beschreiben [Mitschke u. Wallentowitz, 2004], unterscheiden sich die Verläufe in den aktuell auf dem Markt befindlichen Fahrzeugen erheblich voneinander [Barthenheier, 2004].

Die Gestaltung des gesamten Verlaufs über Lenkwinkel sowie Fahrzeuggeschwindigkeit und die Ausprägung der Haltekräfte über der Querschleunigung beschreiben in großen Teilen die Charakteristik des jeweiligen Lenk- sowie Fahrzeugverhaltens.

Weitere empirische Untersuchungen sowie theoretische Betrachtungen speziell zu fahrsituationsabhängigen Lenkmomentverläufen werden in [Good u. a., 1982], [Harnett, 2002], [Hisaoaka u. a., 1996] und [Koide u. Kawakami, 1988] angestellt.

Auch der Anstieg des Handmoments am Lenkrad ist für das gesamte Lenkgefühl von großer Bedeutung, und sollte entsprechend dem Fahrzeugverhalten gewählt werden [Pfeffer u. Harrer, 2013].

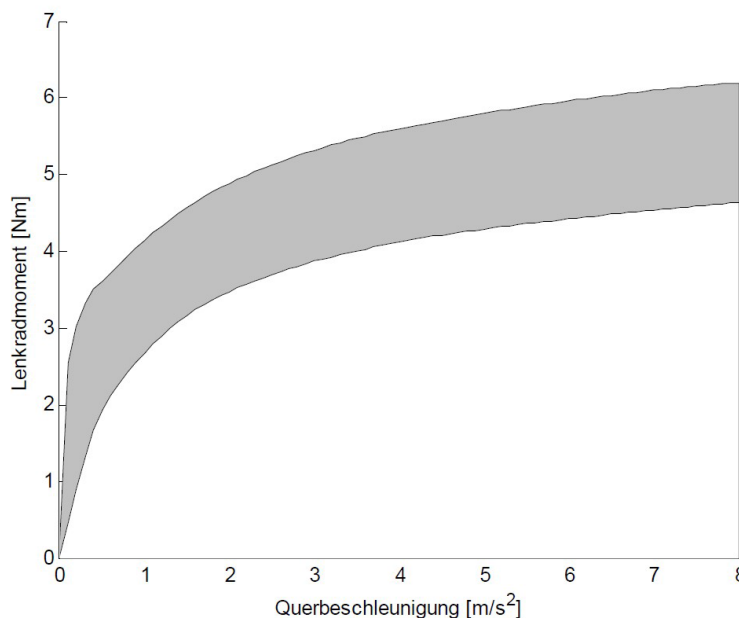


Abbildung 4.2: Gemessene Lenkmomentverläufe bei Sportfahrzeugen [Pfeffer u. Harrer, 2013]

In Abbildung 4.2 werden die Lenkradmomentverläufe über der Querbeschleunigung dargestellt, die in verschiedenen Derivaten sportlich ausgeprägter Fahrzeuge gemessen wurden. Es wird deutlich, dass die Bandbreite der Haltekkräfte relativ groß ist. Das heißt, dass die Höhe des Handmoments keinen besonderen Regeln folgt, sondern von Charakteristik und Auslegungsphilosophie des jeweiligen Fahrzeugherstellers definiert werden.

Ogleich die Höhe der Kräfte individuell gewählt werden kann, gibt es jedoch Kriterien, die für sportlich ausgeprägte Fahrzeuge bei der Lenksystemabstimmung berücksichtigt werden müssen. Um dem Fahrer einen nachvollziehbaren und natürlichen Lenkverhalten zu bieten, müssen die Lenkkräfte möglichst proportional zur Querbeschleunigung verlaufen. Dadurch wird die angestrebte Linearität einer Sportwagen-Achse im Fahrzeug- und Lenkverhalten deutlicher herausgestellt.

Ein weiteres Kriterium des Handmomentverlaufs für ein gutes Lenkgefühl stellt der Verlauf über der Fahrzeuggeschwindigkeit dar. Eine Reihe an Untersuchungen zu diesem Zusammenhang findet sich in [Adams, 1981], [Bertolini u. Hogan, 1999], [Green u. a., 1984], [Sato u. a., 1991] und [Suzuki u. a., 1994]. Hierbei ist der wichtigste Sachverhalt bei sportlichen Fahrzeugen ein gleichbleibender Handmomentenverlauf über Querbeschleunigung bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten >30 km/h und mit relevanten Querbeschleunigungen $>0,1$ g. Es dürfen keine Lenkmomentschwankungen beim Befahren unterschiedlicher Geschwindigkeitsbereiche unter maximaler Querbeschleunigung auftreten.

In Abbildung 4.3 sind optimierte Verläufe des Handmoments über der Querbeschleunigung in drei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen 45, 90 und 145 km/h dargestellt.

Als Manöver für diese Messung wird eine Lenkwinkelrampe bis zur maximalen Querbeschleunigung bei konstanter Geschwindigkeit gefahren.

Das gemessene Lenksystem wurde nach den oben aufgeführten Prämissen abgestimmt. Man erkennt, dass das Handmoment im Bereich zwischen 0,1 g und 0,8 g linear ansteigt. Der Verlauf des Handmomentbetrags ist über den Geschwindigkeiten nahezu identisch.

Um den Komfort eines Fahrzeugs zu steigern und weil es keine fahrdynamische Relevanz hat, ist es empfehlenswert, den Handmomentverlauf im Parkierbereich deutlich abzusenken. Allerdings ist auch hier ein möglichst linearer Anstieg zu den höheren Geschwindigkeiten für ein harmonisches Lenkverhalten von großer Bedeutung.

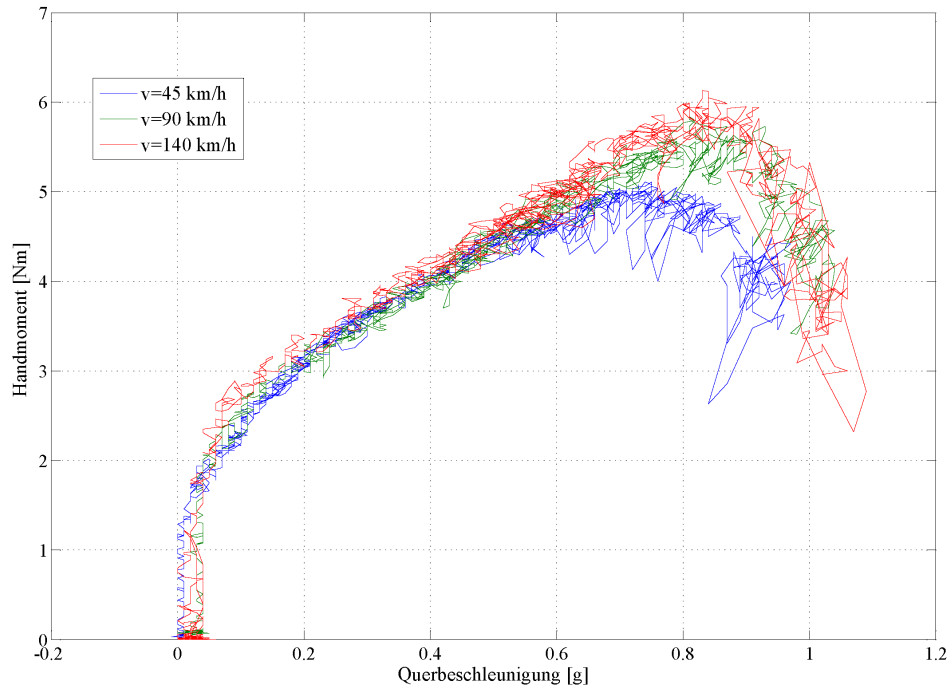


Abbildung 4.3: Gemessene Lenkmomentverläufe über der Querbeschleunigung bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

4.2.2 Führungsverhalten

Als gutes Führungsverhalten wird die Eigenschaft eines Fahrzeugs bezeichnet, den Fahrer zur Spurhaltung und Spurführung mit optimalem fahrerischen Lenkaufwand zu befähigen [Pfeffer u. Harrer, 2013]. Nach [Braess, 2004] bedeutet Führungsverhalten eines Fahrzeugs die Fähigkeit, Lenkbefehle am Lenkrad, unmittelbar und für jede Geschwindigkeit erwartungsgemäß und beherrschbar umzusetzen. Diese Eigenschaft muss für alle Beladungs-, Umwelt- und Straßenverhältnisse nach dem gleichen Gütekriterium umgesetzt werden.

Das empfundene Führungsverhalten ist ein großer Bestandteil des gesamten Lenkgefühls, welches sich, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, in ein Lenkgefühl im engeren und erweiterten Sinn unterscheiden lässt.

Das Lenkgefühl im engeren Sinn beschreibt den direkten Zusammenhang zwischen dem gefühlten Handmoment und dem gestellten Lenkwinkel. Ebenso zählen hierzu gefühlte Unstetigkeiten oder Schwingungen in der Lenkung.

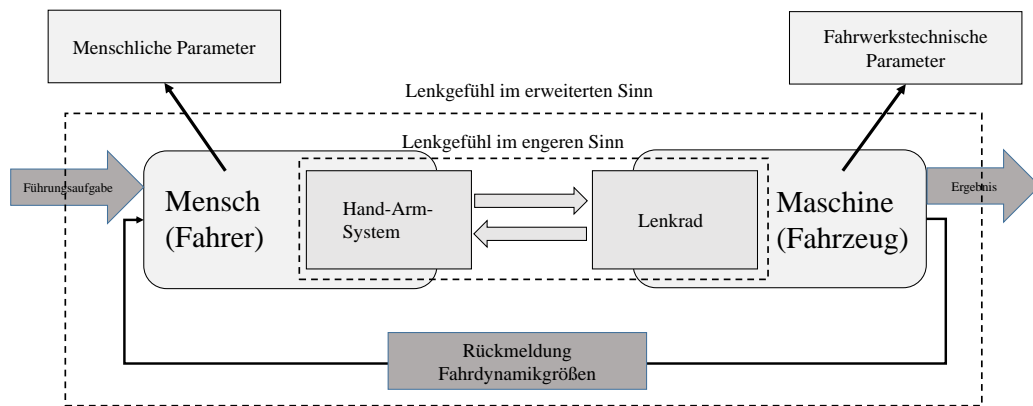


Abbildung 4.4: Lenkgefühl als Regelkreis [Wolf, 2008]

Das Lenkgefühl im erweiterten Sinn umschreibt die Wahrnehmung des Lenksystems unter allen Fahrzeug- und Umweltbedingungen. Es bezeichnet das Empfinden des fahrdynamischen Zustands und die Wahrnehmung der damit verbundenen Zusammenhänge im Lenkmoment. In diesem Regelkreis wird das Lenksystem als ein Teil des Gesamtfahrzeugkonzepts bzw. Fahrwerks bewertet.

Höhe und Verlauf des Lenkmoments an sich haben keine großen Einflüsse auf die Güte des Führungsverhaltens eines Fahrzeugs. In [Waldmann, 1974] und [Waldmann, 1975] wurde nachgewiesen, dass eine Veränderung der Lenkmomentverläufe keine Auswirkungen auf die Lenkwinkelverläufe hat. Ebenso wurden in [Good u. a., 1982] die Lenkmomentverläufe, im Gegensatz zu Gierverstärkung und Ansprechzeit, als nicht relevant für die Fahrzeugführung bewertet. Somit lässt sich das Führungsverhalten als eigenständiger Lenkgefühl-Einflussfaktor betrachten. Das Führungsverhalten eines Fahrzeugs lässt sich anhand der zwei folgenden Aspekte des Lenksystemverhaltens klassifizieren:

- On-Center-Handling und
- Off-Center-Handling.

Das On-Center-Handling beschreibt die Güte des Geradeauslaufs eines Fahrzeugs. Lenkungsspezifisch bedeutet dies, die Güte der Umsetzung von Korrekturbewegungen sowie des Auslenkvorgangs und des Ansprechens. Das gefühlte Handmoment ist dabei der wichtigste Bestandteil des subjektiv empfundenen Geradeauslaufs. Nach [Deppermann, 1989] wird dieses Lenkgefühl vor allem durch das gefühlte Rückstellmoment sowie die Lenkungsreibung im Lenkstrang beeinflusst. Laut dieser Arbeit ergibt sich ein gutes Mittengefühl

bei geringer Lenksäulenreibung, großem Nachlauf und hoher Steifigkeit in der Lenkung.

In [Farrer, 1993] und [Barthenheier, 2004] wird das On-Center-Handling bestehend aus drei Einzelkriterien beschrieben. Die Höhe der Lenkkorrekturen muss möglichst gering sein (Handwheel Activity), für den Fahrer muss es nachvollziehbar sein, wie hoch die Lenkkorrektur ausfallen muss und das Fahrzeug muss präzise auf diese Lenkbewegung ansprechen.

In Abbildung 4.5 werden die Mittengefühl-beschreibenden Faktoren anhand einer Hysteresemessung nach [Farrer, 1993] dargestellt. Diese sind:

- Steifigkeit,
- Totzeit und
- Reibung.

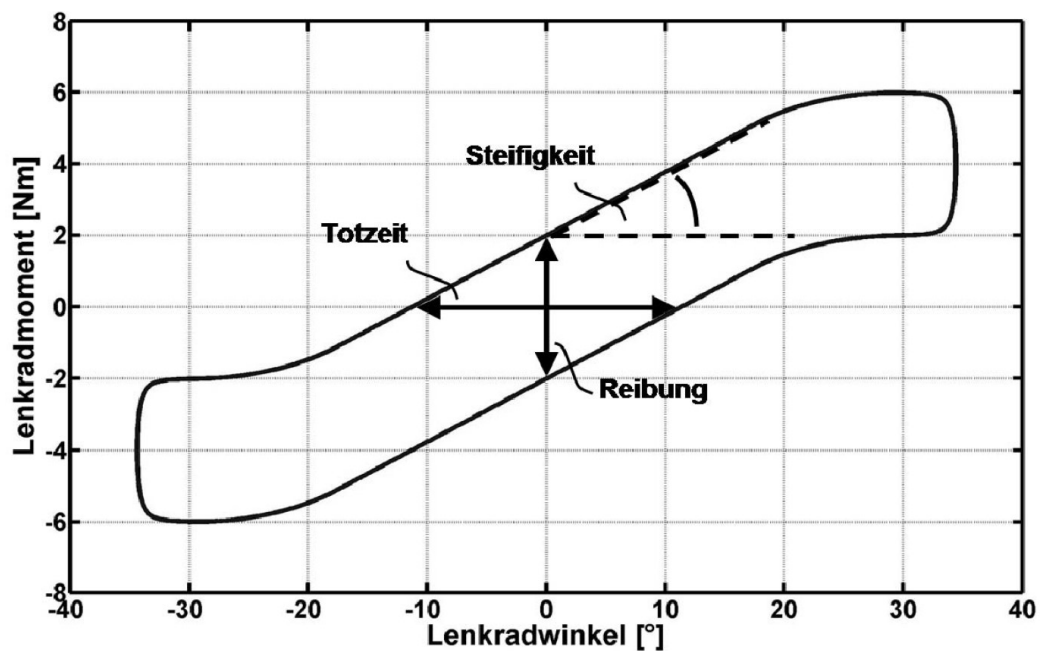


Abbildung 4.5: Kennwerte für Mittengefühl anhand einer gemessenen Hystereseschleife [Farrer, 1993]

Die Messung beschreibt einen Lenk-Sinusverlauf im Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit $v = 100 \text{ km/h}$, einer Frequenz von $f = 0,2 \text{ Hz}$ und einer Auslenkamplitude bis zu einer Fahrzeug-Querschleunigung von $a_y = 1 \text{ m/s}^2$.

Gemessen und ausgewertet werden der Lenkwinkel sowie das Handmoment. Die charakteristischen Parameter für die Beurteilung des Mittengefühls sind die Totzeit (Hysteresebreite in der Horizontalen bei $M_{LR} = 0Nm$), die Reibung (Hysteresebreite in der Vertikalen bei $\varphi_{LR} = 0^\circ$) sowie die Steifigkeit, also der Gradient des Handmomentenanstiegs über dem Lenkwinkel aus der Nulllage heraus.

In der Arbeit [Dettki, 1997] wird die optimale Steifigkeit beim Auslenken aus der Mitte unter Versuchsbedingungen nach [Farrer, 1993] mit

$$\frac{\Delta M_{LR}}{\Delta \varphi_{LR}} = 9,5 \frac{Nm}{rad} \quad (4.3)$$

angegeben.

Die Untersuchungen aus [Aurell u. a., 2000] zeigen anhand von Probandenversuchen an einem Nutzkraftfahrzeug-Simulator, dass für ein angenehmes, nachvollziehbares Führungsverhalten folgende fahrdynamischen Eigenschaften erfüllt sein müssen:

- kleine Ansprechzeit zwischen Handmoment und Fahrzeugreaktion und
- kleine Hysterese zwischen Handmoment und Querbeschleunigung.

Das Off-Center-Handling beschreibt das Führungsverhalten eines Fahrzeugs unter Querbeschleunigungen $a_y > 1m/s^2$. In dieser Fahrsituation geht es ebenfalls um ein gutes Ansprechen des Fahrzeugs bei Korrekturbewegungen sowie um eine hohe Präzision und Lenkruhe bei konstanten Lenkwinkeln oder sehr langsamen Lenkbewegungen [Pfeffer u. Harrer, 2013].

Nach [Döhring, 1961] ist für eine hohe Präzision der Fahrzeugführung die Lenkelastizität und die damit verbundene Eigenfrequenz des Lenksystems von hoher Bedeutung. In der Arbeit [Mouri u. a., 2007] wurden subjektive Beurteilungen von Lenksystemen mit fünf unterschiedlichen Eigenfrequenzen und Dämpfungsgraden hinsichtlich Lenkruhe und Führungsverhalten durchgeführt. Die jeweiligen Dämpfungsmaße und Eigenfrequenzen der beurteilten Lenksysteme sowie die Ergebnisse der subjektiven Beurteilungen sind in Abbildung 4.6 abgebildet. Die Lenksysteme wurden nach vier folgenden Subjektkriterien beurteilt:

- stabil,
- schwingend,

- zäh, stickig und
- frei.

In der Untersuchung wurde ein Lenksystem am besten beurteilt, welches eine Eigenfrequenz zwischen 6 und 7 Hz und ein Dämpfungsmaß zwischen 0,8 und 0,9 aufwies. Aus der Gesamtheit der Beurteilungen ist hervorgegangen, dass Lenksysteme mit höheren Eigenfrequenzen bei gleichzeitig hoher Dämpfung am besten bezüglich Führungsverhalten bei Kurvenfahrt beurteilt werden.

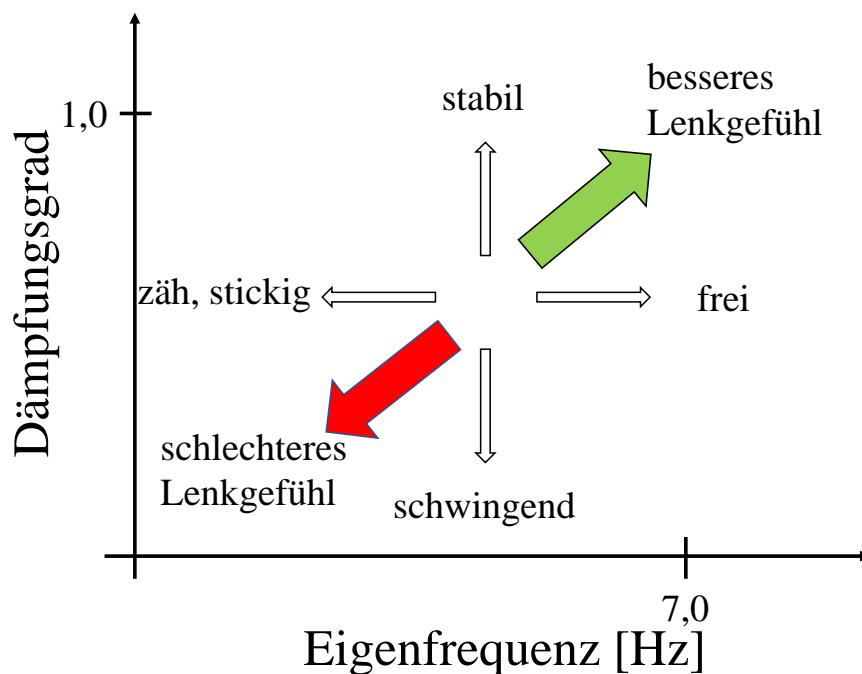


Abbildung 4.6: Dämpfungsmaß über Eigenfrequenz eines Lenksystems nach [Mouri u. a., 2007]

In [Higuchi u. a., 1996] wurden dynamische Fahreigenschaften bei unterschiedlicher Querschleunigung bewertet. In diesen Untersuchungen wurde identifiziert, dass der Zeitverzug zwischen Lenkbewegung und Giergeschwindigkeit eine wichtige Stellgröße für das Off-Center-Handling der Fahrzeuge darstellt.

Nach [Ersoy u. Heißing, 2008] muss für ein gutes Führungsverhalten das Lenksystem die eingeleitete Kursänderung unverzüglich und durch den Fahrer vorhersehbar umsetzen. Hierbei ist auf eine stetige Korrelation zwischen Lenkrad- und Radlenkwinkel zu achten.

4.2.3 Rückmeldung

Die Rückmeldung eines Lenksystems ist der Haupteinflussfaktor auf seine Beurteilung im Fahrzeug. Zusätzlich zu diesem dominierenden Einfluss auf das Lenkgefühl, ist sie neben der Lenkleistung die wichtigste Eigenschaft eines Lenksystems in sportlichen Hochleistungsfahrzeugen. Und nicht zuletzt bestimmt sie im Wesentlichen das Sicherheitsempfinden beim Bewegen eines Fahrzeugs im hochdynamischen Bereich.

Wie [Grassmann u. a., 2003] verdeutlichen, wird ein sicheres Lenkgefühl durch einen guten Kontakt zur Fahrbahn vermittelt. Dieser Zusammenhang wurde anhand von Fahrzeugversuchen nachgewiesen. Die Reibungsverhältnisse an den Kontaktflächen zwischen den Reifenlatschen und der Fahrbahn müssen sich in passender Ausprägung im Lenkgefühl wiederfinden.

Die Ergebnisse aus [Odenthal u. a., 2003] zeigen, dass durch den genauen statischen und dynamischen Zusammenhang zwischen Kräften am Rad und Momenten im Lenkrad maßgeblich das Lenkgefühl bestimmt wird.

Eine der wichtigsten Arbeiten auf dem Gebiet der Lenkungsrückmeldung bei elektromechanischen Lenksystemen stellt [Brunn u. Harrer, 2004] dar. In dieser Arbeit werden in einer vereinfachten theoretischen Art und Weise die Informationen aus der Fahrbahn in Nutz- und Störinformation unterteilt und Überlegungen zu einem optimalen, dazu passenden Lenksystem-Übertragungsverhalten angestellt. Nach der dort beschriebenen Spezifikation stellen folgende Ereignisse Nutzinformationen im hohen Frequenzbereich im Lenksystem dar:

- Anzeigen einer Aquaplaningsituation,
- Reibwertänderungen,
- Spurrilleninformation und
- Rückmeldung der vorhandenen Seitenkraftreserve.

Zu den Störinformation zählen:

- Lenkradschwingungen beim Bremsen,
- Lenkradschwingungen durch Unwucht der Räder,
- Lenkradstöße beim Überfahren von Hindernissen und
- höherfrequente Lenkradschwingungen aller Art.

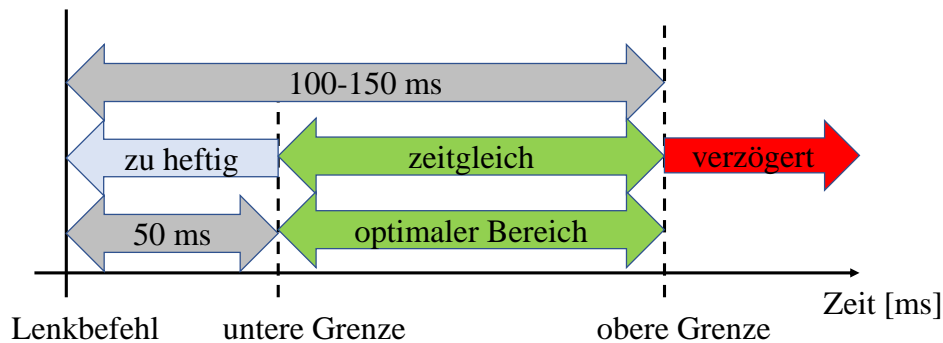


Abbildung 4.7: Zeitlich Wahrnehmung einer Lenkungsrückmeldung nach [Wolf u. Bubb, 2003]

Demnach stellt der Reibwertsprung wie bei einem μ -split-Manöver den Nutzinformationsgehalt mit einer maximalen Frequenz der Nutzinformationen dar. Anlehnend an die Untersuchungsergebnisse aus [Wolf u. Bubb, 2003], die in Abbildung 4.7 dargestellt sind und die zeitliche Wahrnehmung eines Menschen im haptischen Bereich darstellen, werden in der Arbeit von [Brunn u. Harrer, 2004] dazu passende Übertragungsfunktionen mit der entsprechenden Eckfrequenz spezifiziert.

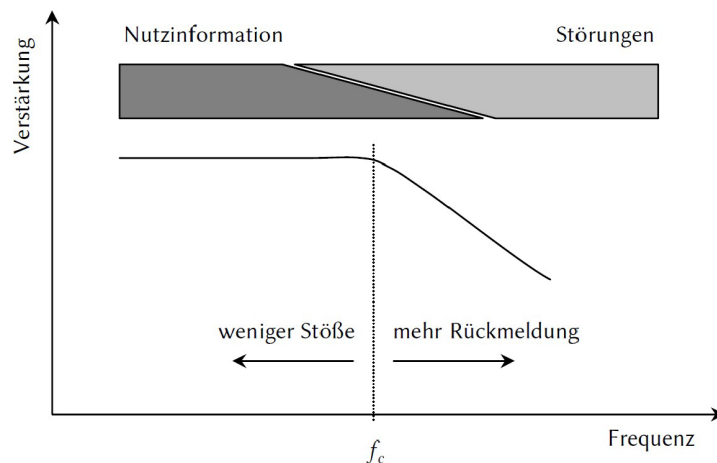


Abbildung 4.8: Bereiche der Stößigkeit und Rückmeldung im Frequenzband der Anregung [Koch, 2010]

Das Lenksystem wird hierbei in der Simulation über einen Butterworth-Tiefpassfilter angenähert. Die Anregung eines Reibwertsprungs wird näher-

rungsweise über einen Impuls eingeleitet. Im Ergebnis werden Eckfrequenzen des Filters definiert, die nach einer Impulsanregung im Ausgang die definierten Wahrnehmungsschwellen des optimalen Bereichs nicht überschreiten.

Diesen Zusammenhängen folgend wird es also eine Grenz-Eckfrequenz geben, ab der die Rückmeldung auch zu hoch werden kann und das Lenksystem als stößig beurteilt wird, so wie dies in Abbildung 4.8 vereinfacht dargestellt ist.

Das Resultat der in [Brunn u. Harrer, 2004] angestellten Überlegungen ist schematisch in Abbildung 4.9 dargestellt.

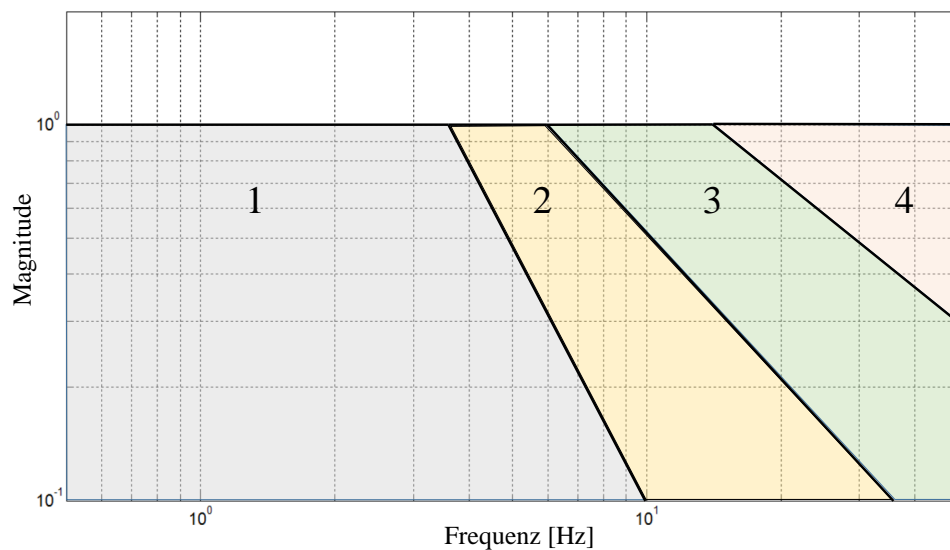


Abbildung 4.9: Bereiche des Lenksystem-Übertragungsverhaltens nach [Brunn u. Harrer, 2004]

Es existieren demnach vier Bereiche der Lenkübertragungsfunktionen mit vier spezifischen Eckfrequenzen. Liegt die Eckfrequenz der Übertragungsfunktion des Lenksystems im Bereich 1, so zeigt das Lenksystem zu wenig Rückmeldung. Die Nutzinformationen kommen nicht im vollen Umfang zum Fahrer, sondern werden durch das System herausgefiltert. Lenksysteme mit Störübertragungsfunktionen im zweiten Bereich bieten ausreichend Nutzinformationen und sind dabei nicht stößig. Lenksysteme für sportlich orientierte Fahrzeuge müssen Ihre Übertragungsfunktion im dritten Bereich liegen haben. In diesem Bereich liegt das Optimum in einer maximal möglichen Transparenz bei gleichzeitig keiner oder nur geringer Stößigkeit des Systems. Informationen die in den Frequenzspektren des Bereichs vier liegen, zählen zu Störinformation und werden im Optimalfall vermieden.

Die Ausprägung des rückmeldenden Verhaltens eines Lenksystems in der Höhe der Amplitudenverstärkung muss für das jeweilige Fahrzeugderivat unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte Systemstabilität, Komfortempfinden und Einsatzbereich passend gewählt werden.

4.3 Funktionale Anforderungen an die Software

Aus den oben beschriebenen Grundanforderungen an das Lenksystem werden in den folgenden Kapiteln funktionale Anforderungen an die Lenksystem-Software-architektur definiert und bezüglich ihrer Umsetzungskonzepte näher vorgestellt.

Um die Abstimmung des Lenksystems anhand von Applikationsmodulen zu vereinfachen und eine Abgrenzung der Wirkbereiche zu ermöglichen, werden die funktionalen Anforderungen nach folgenden Kategorien zusammengefasst:

- Lenkgefühl,
- Rückmeldung,
- Systemverfügbarkeit und
- Spreizung zwischen Komfort und Sportlichkeit.

4.3.1 Lenkgefühl

Das Lenkgefühl eines Lenksystems wird durch eine Reihe an fahrwerkstechnischen Parametern, der mechanischen Ausführung des Lenksystems sowie der funktionalen Ausprägung festgelegt.

Bei der Auslegung des Fahrwerks und des Gesamtfahrzeugs beeinflussen folgende Eigenschaften das Lenkgefühl:

- Aufhängungsgeometrie,
- Steifigkeit der Räder und der Lager,
- Massenträgheit der ungefederten Massen um die Lenkachse,

- Masseverteilung des Aufbaus,
- Aufhängungsdämpfung und
- Reibung [Poirel, 2012].

Bei der Konzeption des einzusetzenden Lenksystems sind zur Darstellung eines positiven Lenkgefühls nachfolgend aufgelistete Parameter zu berücksichtigen:

- Leistung der Servo-Einheit,
- Ritzelübersetzung,
- Sensorauflösung,
- Glattheit des Aktors,
- Lenksystemreibung,
- Massenträgheit der Servo-Einheit und
- Steifigkeit im Drehmomentsensor und der Aktuatorlagerung.

Anders als bei elektromechanischen Lenkungen führt eine genaue Abstimmung und subjektive Beurteilung der oben aufgeführten System- und Fahrzeugparameter bei rein mechanischen oder hydraulisch unterstützten Lenksystemen in großem Umfang zu einem positiven Empfinden des Lenkgefühls und der Rückmeldung.

Bei EPS stellen die Funktionssoftware sowie die Regelung des Elektromotors weitere erhebliche Einflussfaktoren auf das Lenkverhalten und -empfinden bei der Fahrzeugführung dar. Die funktionale Ausprägung und entsprechende Abstimmung der Funktionsmodule bieten hohe Potenziale in der exakten Definition des Lenkcharakters. Die Anforderungen an solche Funktionsmodule werden im Folgenden zusammengetragen.

Die Abstimmung des Lenkgefühls findet auch heute in großen Teilen über subjektive Abstimmungsfahrten statt. Die Abstimmung muss auch auf sich ändernde Fahrbahneigenschaften und diverse Lenkeingriffe des Fahrers reagieren. Dem Fahrer soll stets ein sicheres und komfortables Lenkgefühl vermittelt werden [Grassmann u. a., 2003]. Wie schon im Kapitel 4.2 beschrieben, sind hierbei das Ansprechverhalten sowie eine sensible Interaktion zwischen Fahrer und Fahrbahn von höchster Relevanz.

Weil die Abstimmung sowie die Beurteilung von Lenksystemen in der Entwicklungsarbeit in hohem Maß auf Basis von Subjektivurteilen stattfindet, werden folgende Beurteilungskriterien zur Entwicklung und Bewertung von funktionalen Konzepten definiert.

Beim Lenkgefühl handelt es sich um die subjektive Wahrnehmung des dynamischen Verhaltens des Fahrzeugs auf die durch den Fahrer hervorgerufene Eingabe am Lenkrad. Hierbei untergliedert sich das Lenkgefühl nach einer Erhebung bei Experten in das Führungsverhalten und das Rückmeldeverhalten:

- Sauberer Rücklauf aus dem Stillstand,
- freies Umlenken und Korrigieren in der Kurve,
- “souveränes“ Mittengefühl,
- Dämpfung bei Gierschwingungen,
- “sattes“ Lenkgefühl bei dynamischen Lenkmanövern auf Handlingkursen.

Die oben aufgeführten Kriterien entstammen einer Vielzahl an Applikations- und Bewertungsfahrten mit Lenksystemexperten und definieren in vollem Umfang diese Anforderungskriterien an subjektives Wunsch-Lenkgefühl. Diese Subjektivanforderungen werden in Kapitel 5 dazu verwendet, bestehende und neuartige, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, Funktionsmodule bezüglich der jeweiligen Applikationseinflüsse zu bewerten.

4.3.2 Rückmeldung

Wie zuvor schon beschrieben, weisen EPS-Lenkgetriebe starke Beeinträchtigungen beim Übertragen von Nutzinformation an den Fahrer auf. Aufgrund der hohen reduzierten trägen Masse des Elektromotors werden Anregungen mit hohen Frequenzen herausgefiltert.

Es gibt allerdings Möglichkeiten, diese mechanisch reduzierte Rückmeldung über die Regelung des Lenksystems zu verbessern. Drei unterschiedliche Regelungsansätze werden in Kapitel 5 vorgestellt und bezüglich ihrer Potenziale zur Rückmeldungsoptimierung miteinander verglichen.

Das Rückmeldeverhalten dieser Regelungsarchitekturen wird objektiv anhand von Messungen des Übertragungsverhaltens am Prüfstand bewertet.

Prüf-Lenksystem im Achsverbund

Lenksystem als Aktuator

Die äußere Anregung wird bei diesem Versuch über das Rad mit definierten Lenkhebeln eingebracht. Als Pulser dient hier ein über Sondersoftware ansteuerbares Lenkgetriebe. Die zu untersuchende Lenkung ist in der Fahrzeugachse verbaut. Um die Kinematik eines stehenden Fahrzeugs nachzubilden, wurden die Federbeine durch starre Elemente ersetzt und über Kugelgelenke mit dem Achsgestell verbunden. Zusätzlich wurden mittels Dehnungsmessstreifen Kraftmessstellen an der Krafteinleitung am Rad und an der Spurstange des zu untersuchenden Lenksystems angebracht.

Die Ergebnisse dieser Achsversuche wurden anschließend mit den Prüfstandsergebnissen verglichen. Das Resultat dieses Vergleichs mit einem passiven Lenksystem ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

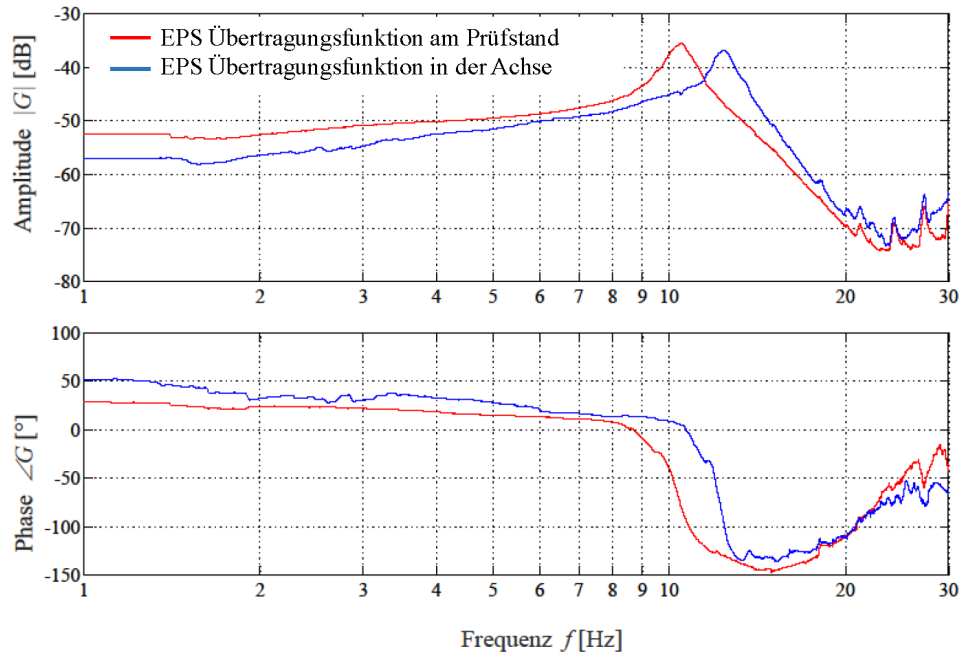


Abbildung 4.11: Vergleich des Übertragungsverhaltens eines passiven Lenksystems (rot) mit einem passiven Lenksystem im Achsverbund (blau)

Ist bei dem Versuch die Lenkunterstützung des Lenksystems deaktiviert, so wird erkennbar, dass sich die Übertragungsfunktionen der gesamten Achse und des extrahierten Lenksystems in der Eckfrequenz unterscheiden. Für das Lenksystem liegt die Eckfrequenz zwischen 10 und 11 Hz, für die Achse bei ca. 13 Hz.

In Abbildung 4.12 ist die Auswertung desselben Versuchs mit einem aktivierten Lenksystem dargestellt.

In dieser wird deutlich, dass das dynamische Verhalten beider Systeme im Bereich zwischen 6 und 20 Hz nahezu identisch ist. Bei der in diesem Versuch untersuchten Achse stellt das Lenksystem den stärksten Anteil in dem für die Nutzinformationen relevanten Frequenzbereich dar. Diese Auswertung beweist, dass es bei diesem Aufbau durchaus möglich ist, das Rückmeldeverhalten des Lenksystems anhand von einfacheren Messungen an einem Lenksystemprüfstand zu untersuchen und dadurch auch Schlüsse auf das Verhalten im Fahrzeug ziehen zu können.

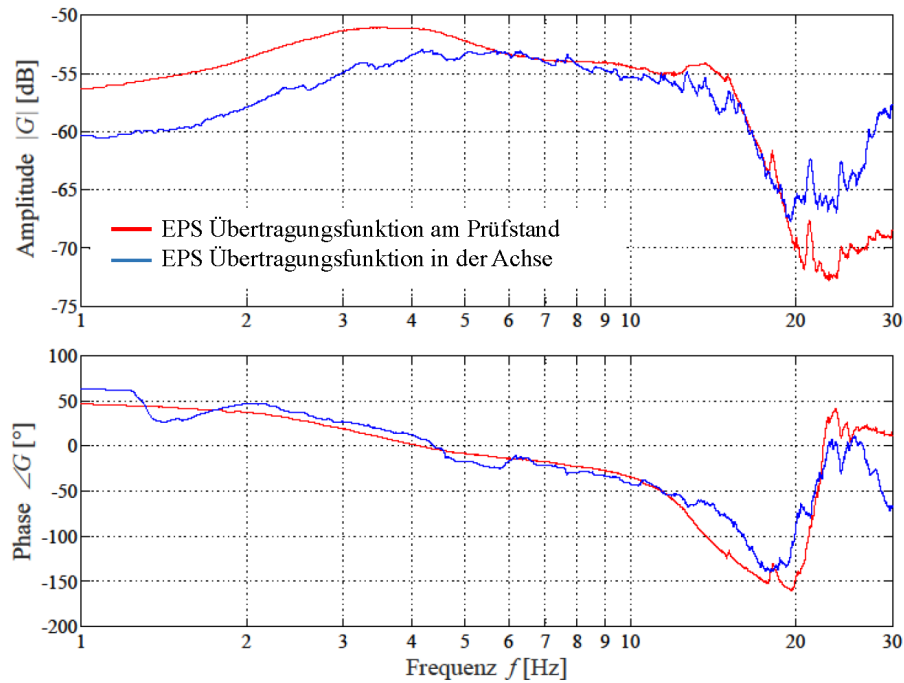


Abbildung 4.12: Vergleich des Übertragungsverhaltens eines aktiven Lenksystems (rot) mit einem aktiven Lenksystem im Achsverbund (blau)

Auch wenn mit einem solchen Versuch ein Objektivierungskriterium für den Vergleich unterschiedlicher Regelungsansätze und Parametrierungen gefunden wurde, ersetzt es nicht die subjektive Bewertung und Anpassung der Reglerabstimmungen im Fahrversuch.

Es umfasst auch keine Aussagen über die Robustheit und Stabilität der jeweiligen Reglerparametrierung unter allen Umweltbedingungen und Fahrzuständen. Dennoch ist es möglich und notwendig anhand solcher Versuche Anforderungen an ein Lenksystemverhalten bezüglich des rückmeldenden Verhaltens zu definieren und entsprechend abzu prüfen.

Kapitel 5

Umsetzung der EPS-Anforderungen in der Software

Konventionell wird eine Funktionssoftware aus einzelnen Modulen zur Applikation des kundenrelevanten Verhaltens im Fahrzeug aufgebaut. Ausgehend von den gebräuchlichen Lenkgetrieben ist die Applikationsumgebung aus folgenden Modulen aufgebaut:

- Reibungskompensation,
- Trägheitskompensation,
- Aktive Rückstellung und
- Dämpfung.

In Abbildung 5.1 sind die Applikationseinflüsse dieser Module auf die in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen an ein Lenksystem dargestellt.

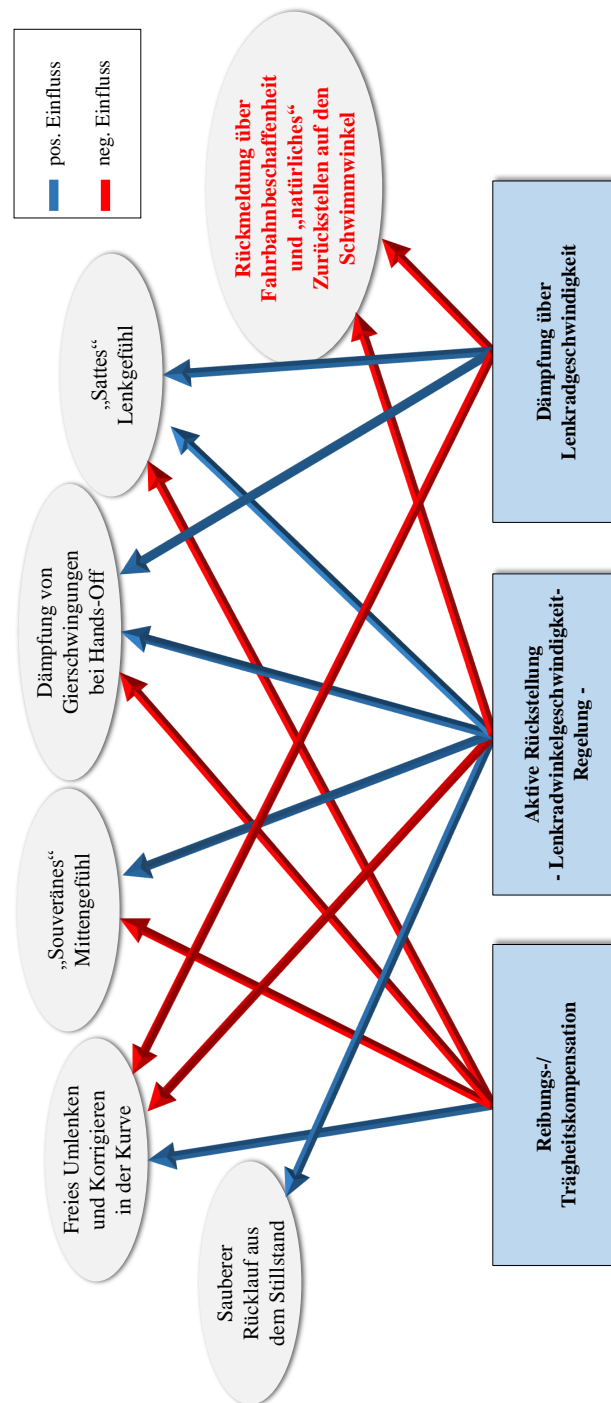


Abbildung 5.1: Applikationseinfluss konventioneller Konzepte (auf Lenkgefühl und Rückmeldung)

Es werden sowohl positive wie auch negative Interaktionen fahrzustandsunabhängiger Funktionen auf die einzelnen Lenkgefühl Aspekte dargestellt.

Reibungs- und Trägheitskompensation werden demnach so appliziert, dass im Fahrzeug das Reibungsverhalten im Zustand des leichten Anlenkens und bei Lenkkorrekturen unter Querschleunigung in Richtung besserer Fahrzeugführung angepasst wird. Werden allerdings mit den Funktionen nur diese Zusammenhänge betrachtet, so ergeben sich dabei negative Rückwirkungen auf die das Mittengefühl und das Dämpfniveau in einem durch Gierschwingungen angeregten System.

Eine wichtige Anforderung an ein elektromechanisches Lenksystem ist der saubere Rücklauf des Lenkrads beim Anfahren mit eingeschlagenem Lenkrad in Richtung des Lenkwinkels von 0° . Das in der Abbildung betrachtete Konzept zum Rücklauf erfasst einen Algorithmus zur Regelung einer Soll-Rücklaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Handmoments und der Fahrzeuggeschwindigkeit. Es besteht demnach die applikative Möglichkeit ein Soll-Rückstellverhalten des Lenksystems über alle Fahrzustände zu modellieren. Durch die Parametrierung des Moduls lässt sich ein glatter Rücklauf aus dem Stillstand erreichen. Über die Fahrzustandsabhängigkeit der Applikation existiert ebenfalls das Potenzial, Mittengefühl und Satttheit im Lenkgefühl positiv zu beeinflussen.

Der größte Nachteil dieses Konzepts liegt allerdings in dem Einfluss des synthetisch modellierten Achsrückstellverhaltens auf die Natürlichkeit der Fahrbahnrückmeldung. Das Lenksystem überzeichnet kontinuierlich die sich mit dem Fahrzustand ändernde Achsrückstellung. Durch die Regelung der Rückstellung in Richtung des Lenkwinkels von 0° , ist die Wahrnehmung der tatsächlich an den Reifen anliegenden Seitenkräfte im Handmoment nicht mehr gegeben, beziehungsweise ist verfälscht. Zum Einen wird die Selbststabilisierung eines übersteuernden Fahrzeugs durch das natürliche Zurückstellen der Achse in Richtung des Kräftegleichgewichts und demnach des Schwimmwinkels verhindert, zum Anderen sinkt die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs aufgrund unplausibler Informationen über den fahrphysikalischen Zustand im Lenkrad.

Bei der lenkwinkelgeschwindigkeitsabhängigen Dämpfung gibt es außerhalb der berücksichtigten positiven Einflüsse ebenfalls mit Anheben der Dämpfungskraft negative Interaktionen im Hinblick auf die Fahrbahnrückmeldung. Zwar wird die Nervosität im Lenkbetrieb reduziert und somit das Lenkgefühl in Richtung Souveränität optimiert, allerdings werden im gleichen Maß die Anregungen aus der Fahrbahn durch das Modul gedämpft. Die Informationen über den Straße-Reifen-Kontakt im Lenkrad werden dadurch deutlich redu-

ziert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die Verknüpfung der Anforderungen an das Lenksystem über die konventionellen Funktionsbausteine sich der Applikationsvorgang äußerst aufwendig und kompromissbehaftet gestaltet.

Im folgenden Abschnitt werden weiterentwickelte Funktionskonzepte zur Auflösung dieser Zielkonflikte bei der Darstellung der einzelnen Anforderungen vorgestellt. Dabei werden die Modulkonzepte in zwei funktionale Untergruppen aufteilt:

- Module zur Applikation des Lenkgefühls,
- Konzepte zur Darstellung der Rückmeldung.

Diese anforderungsbasierte Trennung der Modulstruktur ist notwendig, um die fahrzeugspezifische Lenkgefühl-DNA darzustellen.

Bei den Konzepten zur Darstellung der Rückmeldung werden zunächst existierende EPS-Regelungsstrukturen vorgestellt und bewertet. Anschließend wird die Umsetzung eines Konzepts bezüglich des Aufbaus, der Implementierung und der Validierung detaillierter erläutert.

5.1 Module zur Applikation des Lenkgefühls

In diesem Abschnitt werden folgende das Lenkgefühl beeinflussende EPS-Funktionalitäten vorgestellt:

- Fahrzustandsabhängige Reibungskompensation,
- fahrzustandsabhängige Dämpfung,
- aktiver Rücklauf im niedrigen Geschwindigkeitsbereich und
- trockene Reibung.

Zur Beurteilung der Einflüsse werden die aufgestellten Anforderungen bezüglich des Lenksystem-Verhaltens herangezogen. Zunächst wird jeweils das Wunschverhalten definiert und anschließend das funktionale Konzept vorgestellt und bewertet.

Eine grundsätzliche Anforderung an alle Module ist die Eliminierung der Einflüsse auf die Fahrbahn- und Fahrzustandsrückmeldung.

Durch die modulare Auftrennung des jeweiligen Funktionsspektrums in der SW-Umgebung sollen der Applikationsaufwand und negative Interaktionen zwischen den Modulen reduziert werden.

Alle Module wurden in der Entwicklung in unterschiedliche SW-Umgebungen und Steuergeräte integriert und überprüft. Die funktionalen Modultests wurden auf Modul-, System- und Fahrzeugebene durchgeführt.

5.1.1 Fahrzustandsabhängige Reibungskompensation

Einer Reibungskompensation dient dazu, bei geringeren Lenkwinkelkorrekturen die Reibung im Lenksystem künstlich zu reduzieren. Wie Abbildung 5.2 zeigt, ist hierbei das Ziel, die Wirkung des Moduls auf die Aspekte „soveränes“ Lenkgefühl und freies Korrigieren in der Kurve zu beschränken. Dies bedeutet, dass eine Möglichkeit geschaffen werden muss, über die Funktion den Fahrzustand so einzugrenzen, dass die Aktivierung des Moduls in unerwünschten Zuständen, wie zum Beispiel während einer Dämpfungsanforderung oder bei Gierschwingungen ausbleibt. Dieses Zustandsspektrum wird im Lenksystem mithilfe messbarer und berechneter Größen abgesteckt.

Es werden demnach folgende Anforderungen an den Wirkungsbereich der Reibungskompensation definiert.

Die Funktionalität des Moduls sowie der Applikationsbereich soll bei

- geringer Lenkwinkelgeschwindigkeit,
- höherem Handmoment und
- definiertem Geschwindigkeitsbereich

gewährleistet sein. Um das Modul weiter von negativen Einflüssen abzugrenzen, muss eine automatisierte Abschaltung bei

- Erkennung von Gierschwingungen und
- Erkennung von Instabilitäten im System

integriert werden. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der internen Reibung ist es ebenfalls notwendig, eine Skalierung der Reibungskompensation über der gemessenen Temperatur vorzusehen.

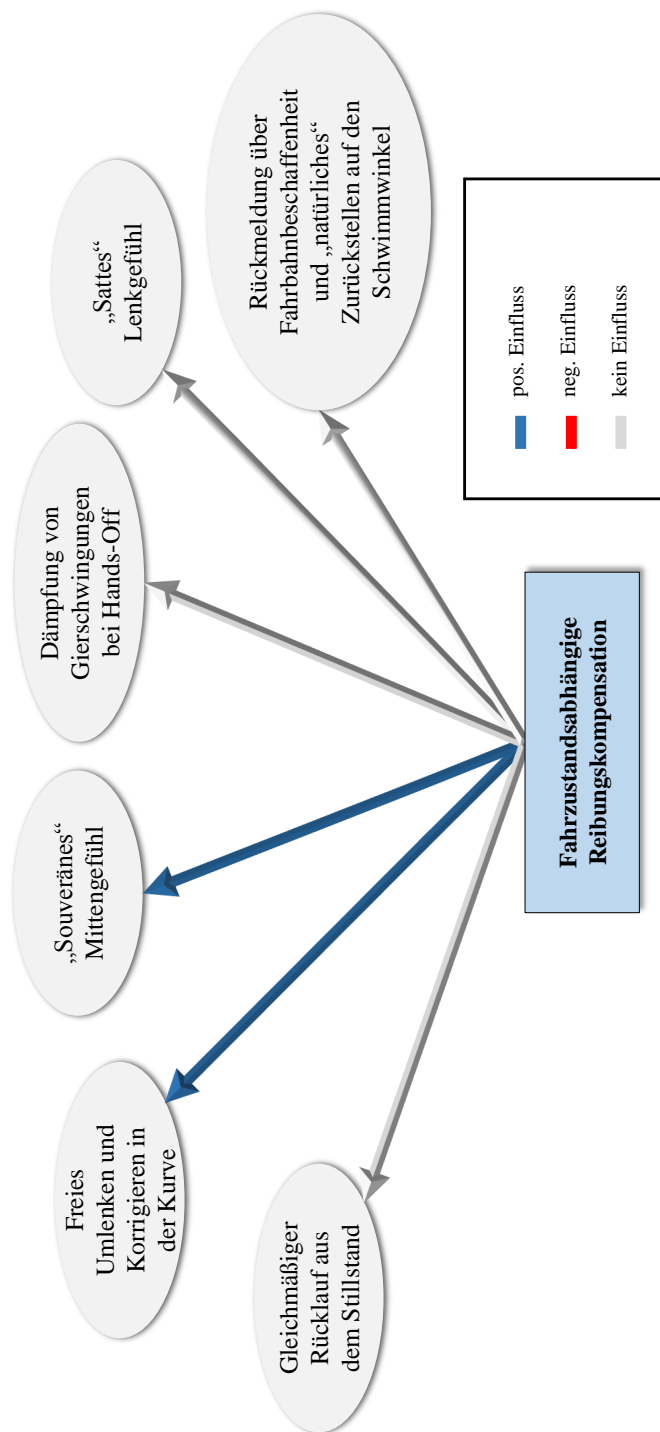


Abbildung 5.2: Einflüsse der Reibungskompensation

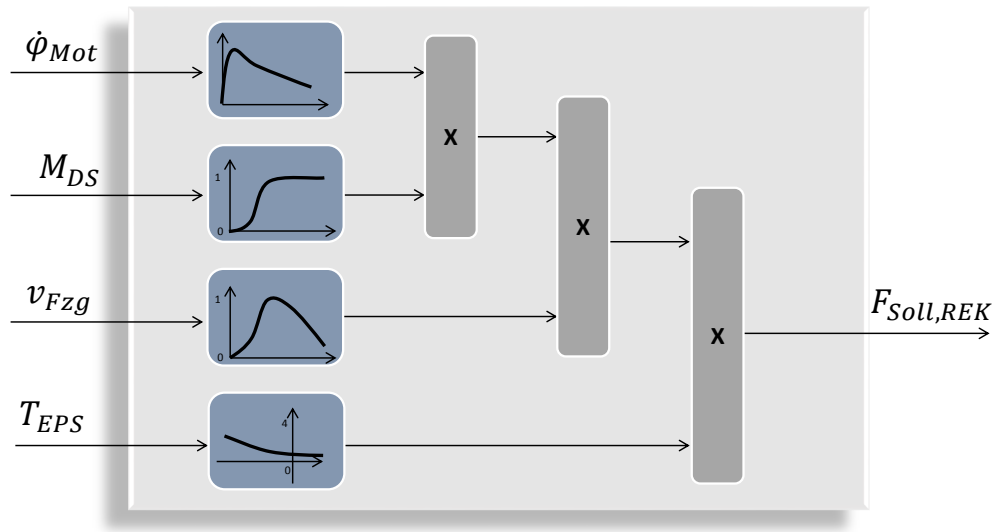


Abbildung 5.3: Fahrzustandsabhängige Reibungskompensation

Schaubild 5.3 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Funktionsmoduls. Die funktionalen Zusammenhänge sind in den dargestellten Kennlinien schematisch abgebildet. Die Grundkraft wird über der Winkelgeschwindigkeit der gemessenen Rotorlage festgelegt und über die übrigen Zustände skaliert.

5.1.2 Fahrzustandsabhängige Dämpfung

Während des aktiven Fahrbetriebs existieren Lenksituationen und Fahrzeugreaktionen, in denen eine Anpassung der Systemdämpfung notwendig ist. In einem elektromechanischen Lenksystem wird dabei eine, der Lenkwinkelgeschwindigkeit entgegengesetzte, Kraft vom Elektromotor gestellt. Es müssen allerdings zwei unterschiedliche Anforderungen an die Dämpfung abgedeckt werden, wie in Abbildung 5.4 dargestellt. Um ein „sattes“ und in sich ruhiges Lenkgefühl darzustellen, wird ähnlich wie bei der Reibungskompensation ein aktiver Bereich für die Dämpfung festgelegt und die Dämpfungskraft über die Lenkwinkelgeschwindigkeit angefordert, siehe Abbildung 5.5.

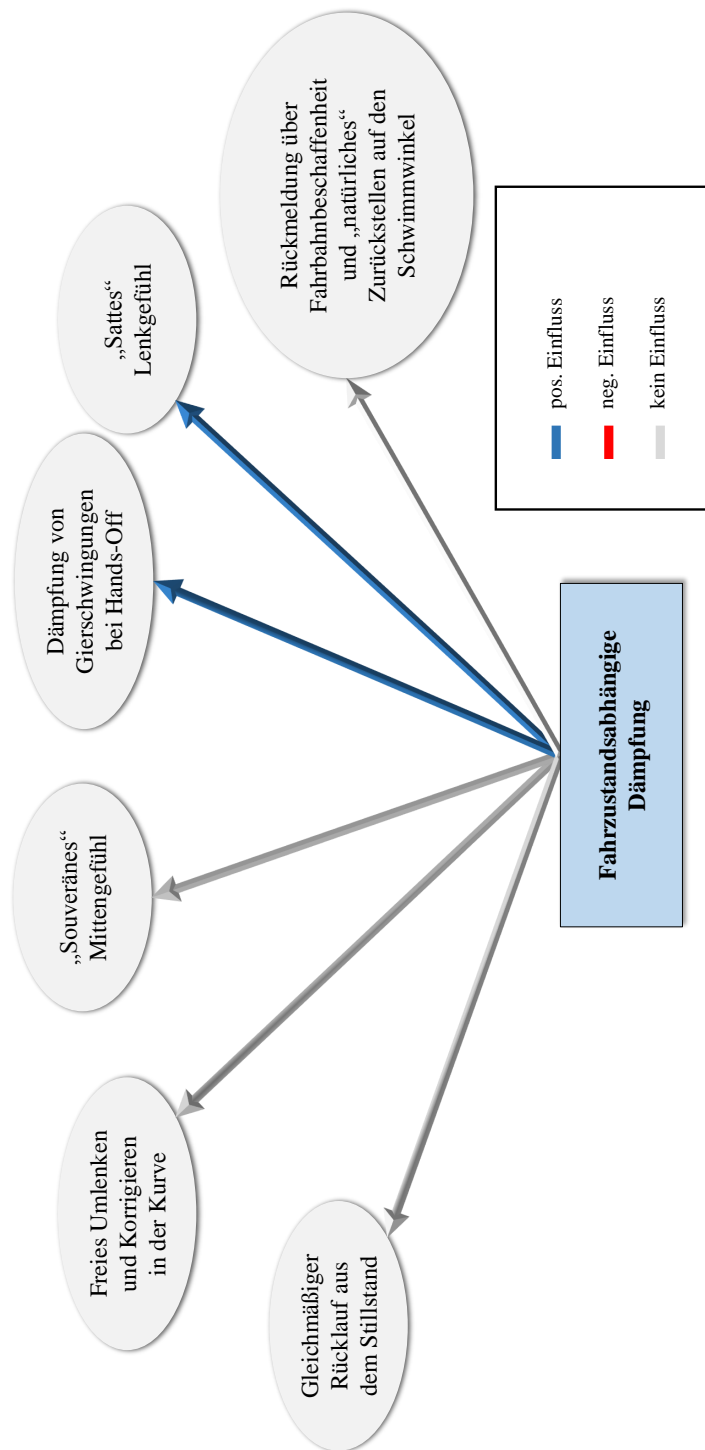


Abbildung 5.4: Einflüsse der Dämpfung

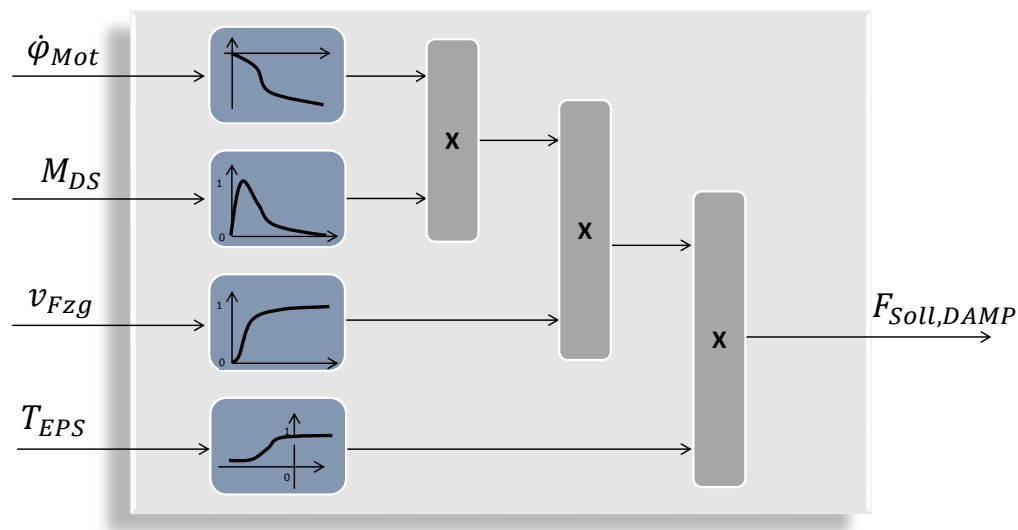


Abbildung 5.5: Fahrzustandsabhängige Dämpfung

Der Bereich in dem die Dämpfung erforderlich wird, lässt sich exakt vom in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Wirkungsbereich der Reibungskompensation trennen.

So wird dieses Modul die Kraft in folgenden Situationen bereitstellen:

- hohe Lenkwinkelgeschwindigkeit,
- niedriges Handmoment und
- definierter Geschwindigkeitsbereich.

Ebenso wird auch hier eine Temperaturabhängigkeit integriert, um bei niedrigen Temperaturen die Dämpfung reduzieren zu können.

Neben der Dämpfung zur Ausbildung eines wertigen Lenkgefühls benötigt ein Lenksystem Dämpfung in einem weiteren Betriebspunkt. Bei Gierschwingungen wird zur Stabilisierung des Fahrzeugs eine stark überhöhte Dämpfung aus dem Lenksystem notwendig. Das gutmütige, selbststabilisierende Verhalten des Lenksystems bei provozierten Fahrzeug-Gierschwingungen stellt eine enorm wichtige sicherheitstechnische Anforderung in der Beurteilung des Lenksystems dar. Zur Bewertung dieses Verhaltens wird das Anreiß-Manöver verwendet. Im Fahrzeug wird dabei bei bestimmten Fahrgeschwindigkeiten das Lenkrad bis zu einem Lenkwinkel von ca 90° ausgelenkt und anschließend schlagartig losgelassen. In Abbildung 5.6 ist die Messung bei einem Anreißmanöver mit geringer Dämpfung aus der EPS dargestellt. Bei einem unge-dämpften Lenksystem ergibt sich aufgrund der Phasenverschiebung zwischen

Gierreaktion und Bewegung der Zahnstange ein gegenseitiges Aufschwingen des Lenkrads und des Fahrzeugaufbaus.

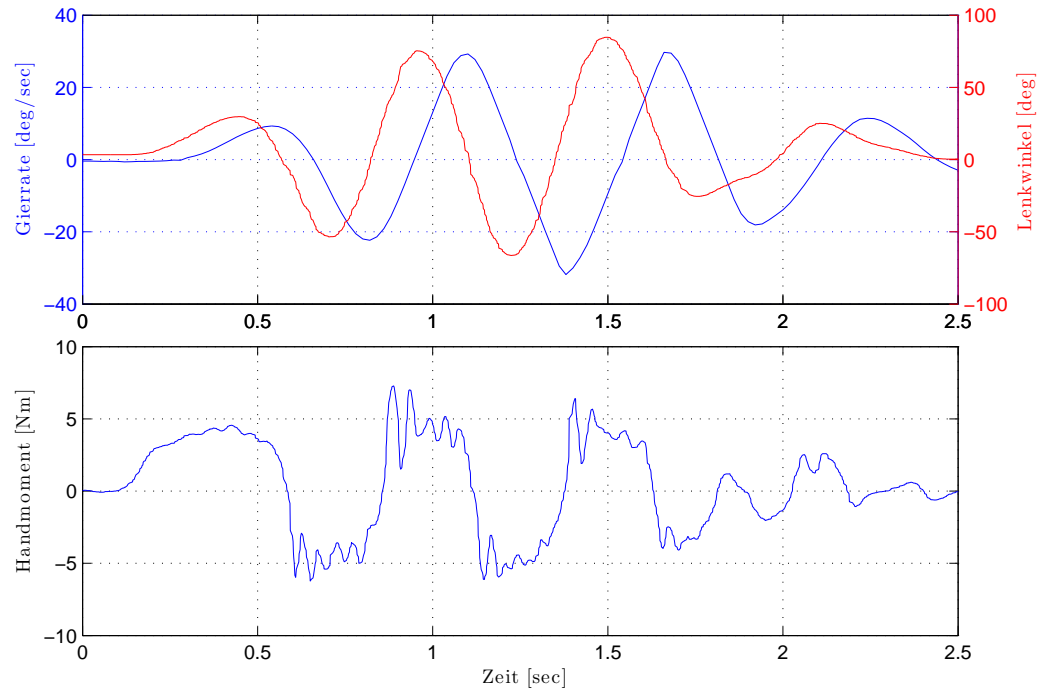


Abbildung 5.6: Anreißen bei geringer EPS-Dämpfung

Konventionell wird in der Applikation des dämpfenden Verhaltens ein Kompromiss zwischen der Darstellung des gewünschten Lenkgefühls und der Fahrzeugstabilisierung im Anreißen gesucht. Es ist demnach nicht möglich eine geforderte Stabilisierung zu erreichen, ohne das Lenksystem in anderen Betriebsbereichen zu überdämpfen.

Um diesen Zielkonflikt aufzulösen, kann ein Modul, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, speziell zur Dämpfung dieser induzierten Hands-Off-Schwingungen integriert werden.

Die Hauptaufgabe dieser Funktion besteht darin, den Hands-Off-Zustand (freie Lenkradschwingung) zu erkennen. Das Grundprinzip dieser Detektion beruht auf der kontinuierlichen Berechnung des Moments aufgrund der Massenträgheit aus dem Lenkstrang und dem anschließenden Abgleich mit dem messbaren Drehstabmoment. Befinden sich beide Größen in dem applizierten Fenster so wird der Hands-Off-Zustand erkannt und die zusätzliche Dämpfung aktiviert. In dem oben abgebildeten Konzept werden die Aktivierungsschwellen über dem Betrag der Momentenabweichung, der Höhe des gemessenen Drehstabmoments und der Lenkradwinkelgeschwindigkeit definiert.

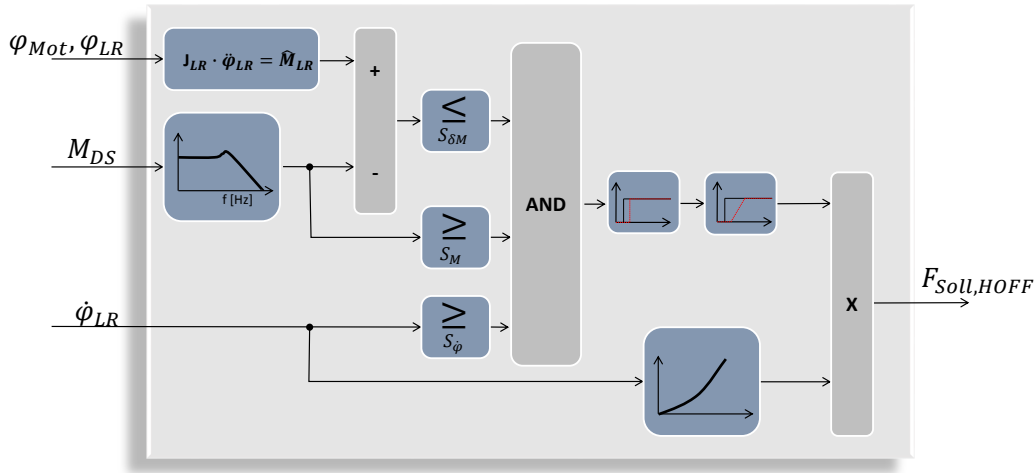


Abbildung 5.7: Dämpfung bei Gierschwingungen

Werden alle Schwellen gleichzeitig überschritten, erfolgt die erste Indikation der Gierschwingung.

Anschließend wird das Rohsignal noch über ein Verzugsglied und eine Gradientenlimitierung weiterverarbeitet, bevor es skalierend in die Dämpfungskraft eingeht. Die Dämpfungskraft ($F_{Soll,HOFF}$) wird konventionell in Abhängigkeit von der Lenkradwinkelgeschwindigkeit appliziert.

Die Berechnung des Handmoments kann über einen Beobachteransatz geschehen. Das Momentengleichgewicht für den Lenkstang ist als Drallsatz mit Gleichung 5.1 aufgestellt

$$M_{Hand} = J_{LR}\ddot{\varphi}_{LR} + M_{Fr,LS} + M_{DS}. \quad (5.1)$$

Das intern gemessene Drehstabmoment wird über die Winkeldifferenz $\Delta\varphi_{DS}$ und die bekannte Drehstabsteifigkeit τ_{DS} berechnet.

$$M_{DS} = \Delta\varphi_{DS} \cdot \tau_{DS} = (\varphi_{LR} - \varphi_{ZS}) \cdot \tau_{DS}. \quad (5.2)$$

Zur Vereinfachung der Berechnung wird die interne Lenkstrangreibung $M_{Fr,LS}$ in der Berechnung vernachlässigt und in dem zu schätzenden Handmoment \hat{M}_{HKB} zusammengefasst

$$\hat{M}_{HKB} = M_{Hand} - M_{Fr,LS}. \quad (5.3)$$

Die Annahmen werden in die Gesamtmomentengleichung 5.1 eingesetzt und die Gleichung für das Handmoment ergibt sich zu folgender Differentialgleichung:

$$\hat{M}_{HKB} = J_{LR} \cdot \ddot{\varphi}_{LR} - \tau_{DS} \cdot \varphi_{ZS} + \tau_{DS} \cdot \varphi_{LR}. \quad (5.4)$$

Zur Überführung der Gleichung in eine Zustandsraumdarstellung wird die Gleichung gemäß

$$\ddot{\varphi}_{LR} = \frac{1}{J_{LR}} \cdot \hat{M}_{HKB} + \frac{\tau_{DS}}{J_{LR}} \cdot \varphi_{ZS} - \frac{\tau_{DS}}{J_{LR}} \cdot \varphi_{LR} \quad (5.5)$$

nach $\ddot{\varphi}_{LR}$ umgeformt.

Um das Handmoment über einen Beobachter anzunähern, wird dieses als interner Zustand aufgefasst. Dadurch, dass die Zustände φ_{ZS} und φ_{LR} intern gemessen werden, kann über eine geeignete Einstellung der Beobacherverstärkung das Fahrermoment hinreichend genau bestimmt werden.

Das intern gemessene Drehstabmoment M_{DS} wird oft in der internen Sensorsoftware vorkonditioniert, um in den Funktionsmodulen weiterverwendet zu werden. Das Drehstabmoment ist als Rohsignal verrauscht und muss aus diesem Grund stark gefiltert werden. Durch diese Filterung entstehen Phasenverschiebungen um bis zu 90 Grad, die ohne Berücksichtigung zu hohen haptischen Unzulänglichkeiten am Lenkrad führen würden. Diese Nachteile werden durch dynamisierende Funktionen beseitigt. Es wird versucht den Drehmomentverlauf vorausszusehen und die Phase in der Servounterstützung durch vorzeitige Ansteuerung des Motors zu kompensieren, beziehungsweise für den Fahrer unbemerktbar zu gestalten.

Um demnach das geschätzte Handmoment zur Erkennung des freien Schwingens nutzen zu können, muss dieses in gleicher Weise wie das Drehstabmoment vorkonditioniert werden. Der Hands-Off-Indikator kann neben der Dämpfung auch für andere Funktionsmodule verwendet werden. So wird beispielsweise, wie bereits beschrieben, die Reibungskompensation in einem freien Schwingzustand abgeschaltet. Ebenfalls ist es empfehlenswert, andere dynamisierende Funktionen über den Faktor abzuschalten, bzw. die Wirkung zu reduzieren.

In Abbildung 5.8 ist die Erkennung eines Anreiß-Manövers dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das geschätzte Handmoment und das gemessene Drehstabmoment im Augenblick des Loslassens nah aneinander liegen. Das Modul ist so eingestellt, dass der Indikator nach circa einer halben Schwingung vollständig die Dämpfung auslöst. Die untere Darstellung verdeutlicht, wie mit dem Indikator die Gierrate des Fahrzeugs nach dem Anreißen auf Grund der zugeschalteten Dämpfung abklingt.

Über den parallelen Betrieb dieser beiden Dämpfungsmodule (Lenkgefühl-Dämpfung und Hands-Off-Dämpfung), kann die Applikation der Dämpfung im vollen Umfang auf das Lenkgefühl und das fahrdynamische Führungsempfinden reduziert werden. Die Dämpfung des Hands-Off-Moduls wird in

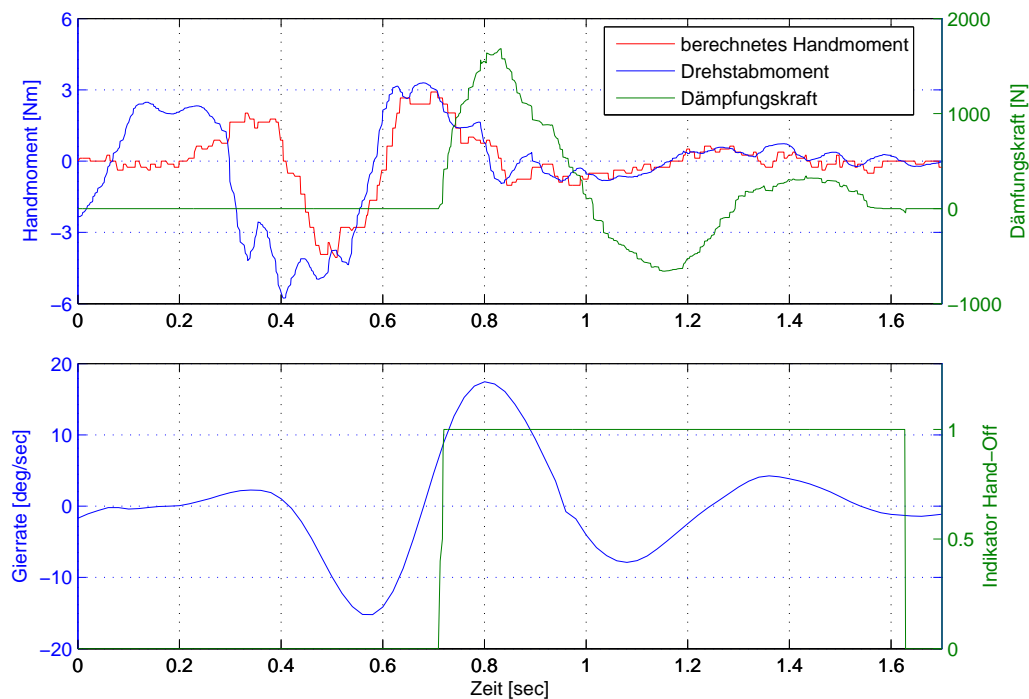


Abbildung 5.8: Anreißen mit Hands-Off-Dämpfung

der Inbetriebnahme-Phase an das Fahrzeug angepasst und festgelegt. Das Modul hat dabei keine Auswirkungen auf das Lenkverhalten im normalen Betriebsmodus.

5.1.3 Aktiver Rücklauf im niedrigen Geschwindigkeitsbereich

Seit dem Einsatz elektromechanischer Lenkgetriebe in Fahrzeugen existieren erweiterte Anforderungen an das Rücklaufverhalten der Lenkung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ($< 30 \text{ km/h}$). Bei mechanischen bzw. hydraulisch-unterstützten Lenkgetrieben definiert sich das Rückstellverhalten aus der Vorderachskinematik (z.B. Gewichtsrückstellung, Lenkhebellänge, Nachlaufstrecken etc.) und der internen Reibungseigenschaften. Wegen priorisierter Berücksichtigung der Fahrwerkeigenschaften in dynamischeren Bereichen, waren die Anforderungen an den Rücklauf der Lenkung im stillstandsnahen Bereich relativ weich formuliert. Heute gibt es die Möglichkeit mit Hilfe des variabel ansteuerbaren Lenksystems dem Fahrzeug ein beliebiges Rücklaufverhalten unabhängig von den mechanischen Einschränkungen aufzuprägen.

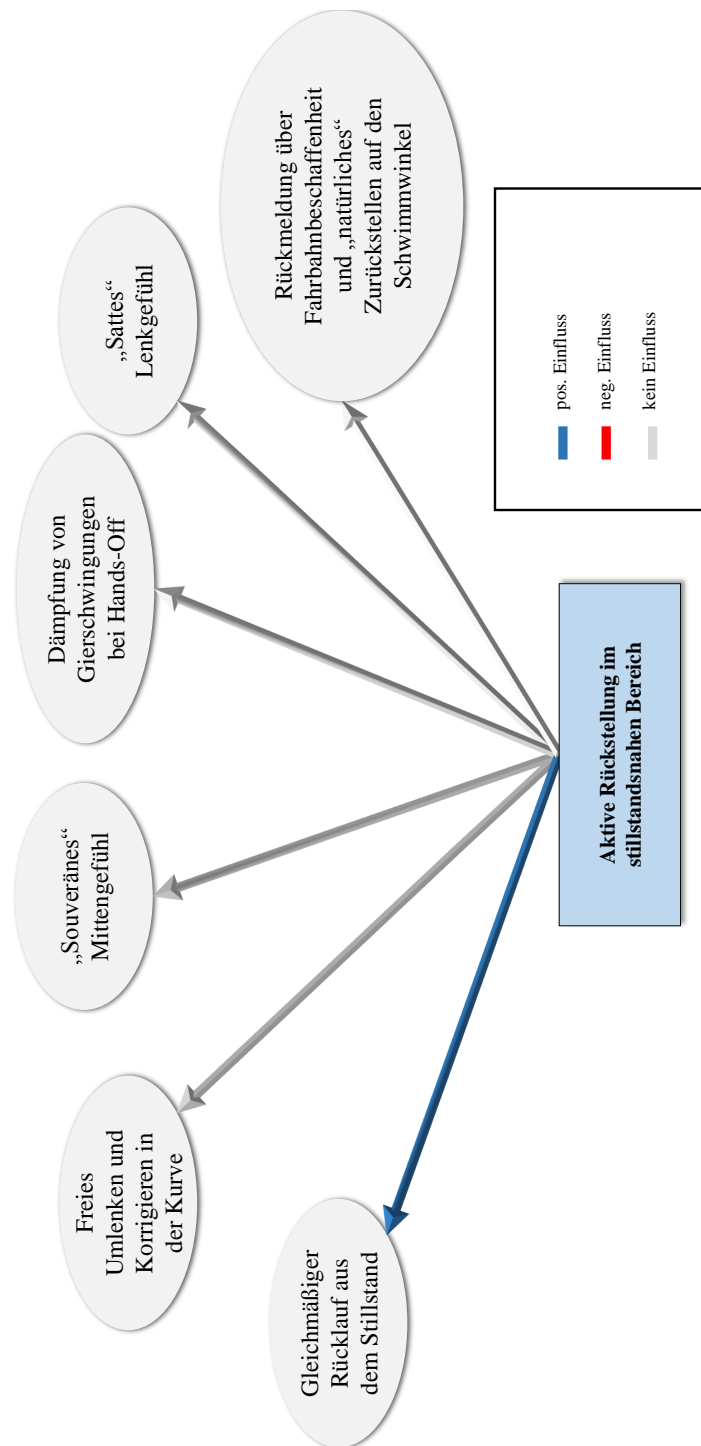


Abbildung 5.9: Einflüsse des Rücklaufmoduls

In diesem Kapitel wird ein Konzept zur Darstellung einer Lenkrad-Rückstellung vorgestellt, welches, wie in Abbildung 5.9 gezeigt, speziell diesen Fahrzustand abbildet, ohne negativ auf die restlichen Anforderungen einzuwirken.

Die Qualitätsmerkmale an die Umsetzung dieses Rücklaufmoduls werden wie folgt zusammengefasst:

- keine Beeinflussung der Rückmeldung und des Lenkgefühls im relevanten Geschwindigkeitsbereich,
- kein synthetischer Eindruck,
- Rücklauf bis auf Lenkwinkel 0° bis 30 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit,
- Begrenzung des Wirkungsbereichs auf niedrige Geschwindigkeiten (bis ca. 50 km/h) und
- über Applikation fahrzeugunabhängig einsetzbar.

Um das natürliche Verhalten der Achse und den Einfluss aus der Fahrbahnbeschaffenheit trotz einer aufgeprägten Rückstellung beizubehalten, wird in dem Grundkonzept von einer Lenkwinkel- oder einer Lenkwinkelgeschwindigkeitsregelung abgesehen. Durch den Einsatz der reinen Ansteuerung des Motors mit einer zustandsabhängigen Rückstellkraft-Anforderung, wird sichergestellt, dass der Rücklauf sich immer mit den Umgebungsbedingungen wie Fahrbahnreibwert, Achskinematik oder Antriebsmoment verändern wird. Somit wird dem Fahrer trotz einer überlagerten Kraft in Richtung der Lenkungsmittle der Eindruck eines natürlichen Achsverhaltens vermittelt. Ein vereinfachtes Konzept für die Grundrückstellung ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

Hier wird im ersten Schritt eine Rückstellkraft über dem Lenkwinkel angefordert, welche dann über das gemessene Drehstabmoment und die Fahrzeuggeschwindigkeit skaliert wird. Die Anpassung über das Drehstabmoment dient dazu, keine störenden Kräfte im Auslenkvorgang an den Fahrer zu übermitteln. Wie auch in anderen Funktionsmodulen wird in der aktiven Rückstellung die Lenkgetriebetemperatur dazu benutzt, die Zähigkeit in einem kalten Lenkgetriebe zu reduzieren und somit das Verhalten temperaturunabhängig darzustellen.

Um die Natürlichkeit des Rücklaufs weiter zu steigern, ist es ratsam, das passive Rückstellverhalten in dem betreffenden Fahrzeug vor der Applikation

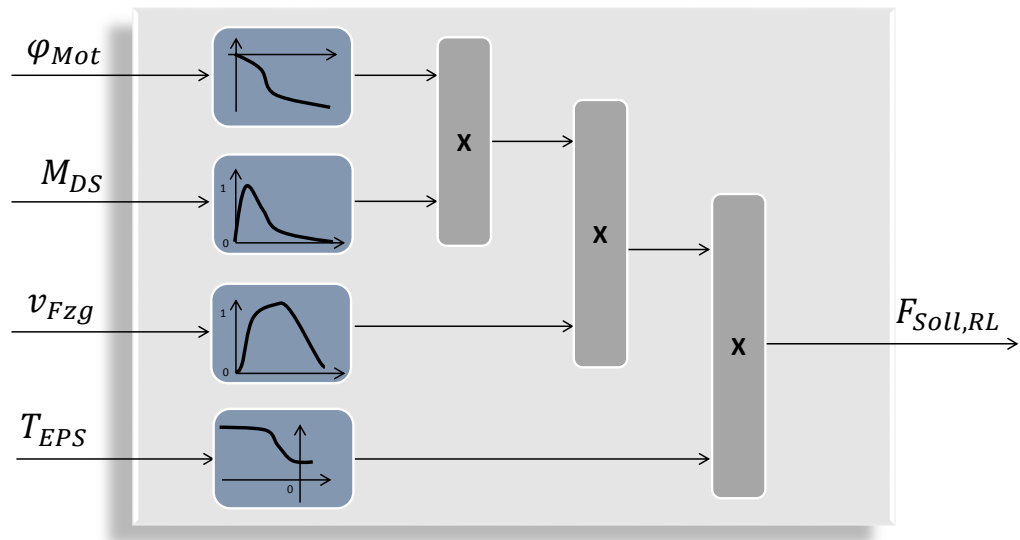


Abbildung 5.10: Grundrückstellung

durch Messungen zu untersuchen und dieses mit dem Einsatz des Moduls soweit wie gewünscht zu verstärken.

Abhängig vom Vorderachs-Konzept, den Reifen sowie dem Antriebsstrang ist es oft nicht möglich mit der reinen Ansteuerung des Servomotors aus dem Rückstellmodul die geforderte Zurückstellung des Lenksystems bis auf den Lenkradwinkel von 0° zu erreichen. Die Haptik für den Fahrer bei Parkiervorgängen oder beim Lenkbetrieb bei langsamer Fahrzeugbewegung und der physikalisch richtige Rücklauf in Richtung des Schwimmwinkels sollen hierbei nicht negativ beeinflusst werden. Aufgrund der geringen Rückstellmomente in Verbindung mit den Bohrmomenten aus den Reifen sowie der Reibung in der Achse, dem Lenkgetriebe und dem Lenkstrang können geringe Restlenkwinkel ($<10^\circ$ Lenkwinkel) bis zu Geschwindigkeiten von circa 60 km/h bestehen bleiben.

Herrscht allerdings dennoch die Intention diese Restlenkwinkel zu überwinden ohne das Lenkgefühl maßgeblich zu verschlechtern, so kann eine Rücklaufregelung wie in Abbildung 5.11 zusätzlich zur Grundrückstellung in die Funktionssoftware integriert werden.

Das dargestellte Konzept beschreibt eine dynamische Lenkwinkelgeschwindigkeitsregelung in Abhängigkeit vom anliegenden Lenkwinkel. Die Soll-Lenkwinkelgeschwindigkeit wird über dem gemessenen Lenkwinkel bedatet. Die Regelabweichung zur Ist-Lenkwinkelgeschwindigkeit wird zusätzlich im Betrag auf einen applizierbaren Wert begrenzt. Um die Dynamik der Regler-

verstärkung in Richtung des Lenkwinkels von 0° zu reduzieren, wird der Verstärkungsfaktor über dem Lenkwinkel variabel vorgegeben. Um auch in diesem Modul die Zustandsabhängigkeit zu berücksichtigen, wird die Reglerkraft noch zusätzlich über das Handmoment und die Fahrzeuggeschwindigkeit skaliert. Das Modul wurde dazu entwickelt, nur die geringen Restlenkwinkel zu überwinden ohne den aktiven Fahrbetrieb zu beeinflussen. Dementsprechend wird der Wirkungsbereich wie folgt festgelegt:

- geringe Lenkwinkel $|\varphi_{Ritzel}| < 10^\circ$,
- niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten und
- geringe Handmomente bis knapp oberhalb der Systemreibung.

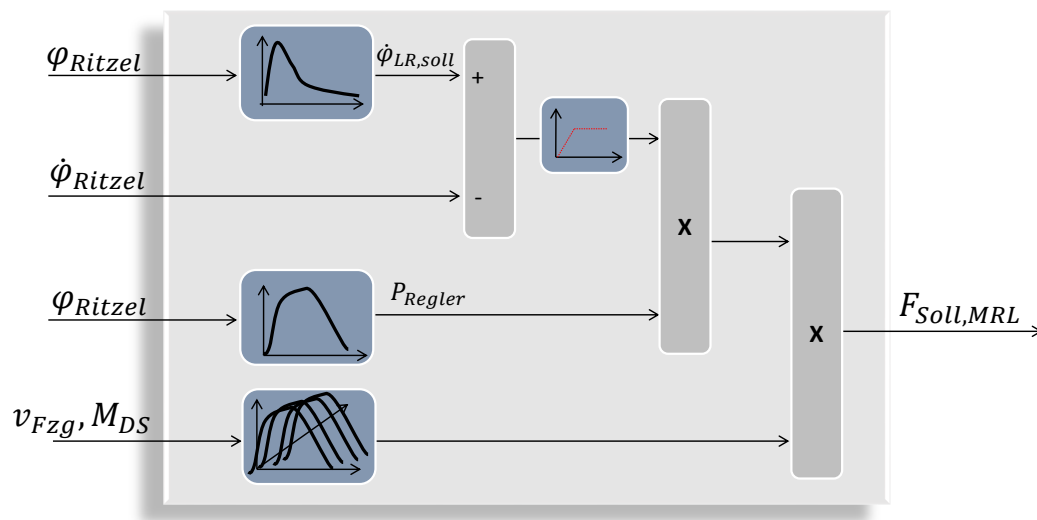


Abbildung 5.11: Mittenrücklauf

Zusätzlich wird die Richtung der Lenkbewegung in diesem Modul in dem Maß berücksichtigt, dass die Regelung ausschließlich bei einer Bewegung in Richtung der Lenkungsmitte stattfindet.

Die beiden Rücklaufmodule werden in Abhängigkeit von den gestellten Anforderungen eingesetzt. Bei sportlich ausgelegten Fahrzeugen wird ein starker Fokus auf die Natürlichkeit des Lenkungsverhaltens gelegt. Dementsprechend können hierbei diese eher komfortorientierten Funktionen in ihrer Wirkung reduziert werden und der überlagerte Mittenrücklauf gegebenenfalls komplett entfallen.

5.1.4 Trockene Reibung

Die bereits vorgestellten Module agieren zustandsbezogen, um das Lenkgefühl applizierbar an die Charakteristik des betreffenden Fahrzeugs anzupassen. Mit der hier zu betrachtenden Funktion „Trockene Reibung“ wird allerdings darauf abgezielt, die Grundcharakteristik des eingesetzten Lenkgetriebes unabhängig vom Lenkbetrieb und Fahrzustand auf der Ebene der Grundreibung zu beeinflussen.

Der Beitrag eines solchen Funktionsmoduls zur Erfüllung der definierten Lenkgefühl Anforderungen ist in Abbildung 5.12 aufgeführt.

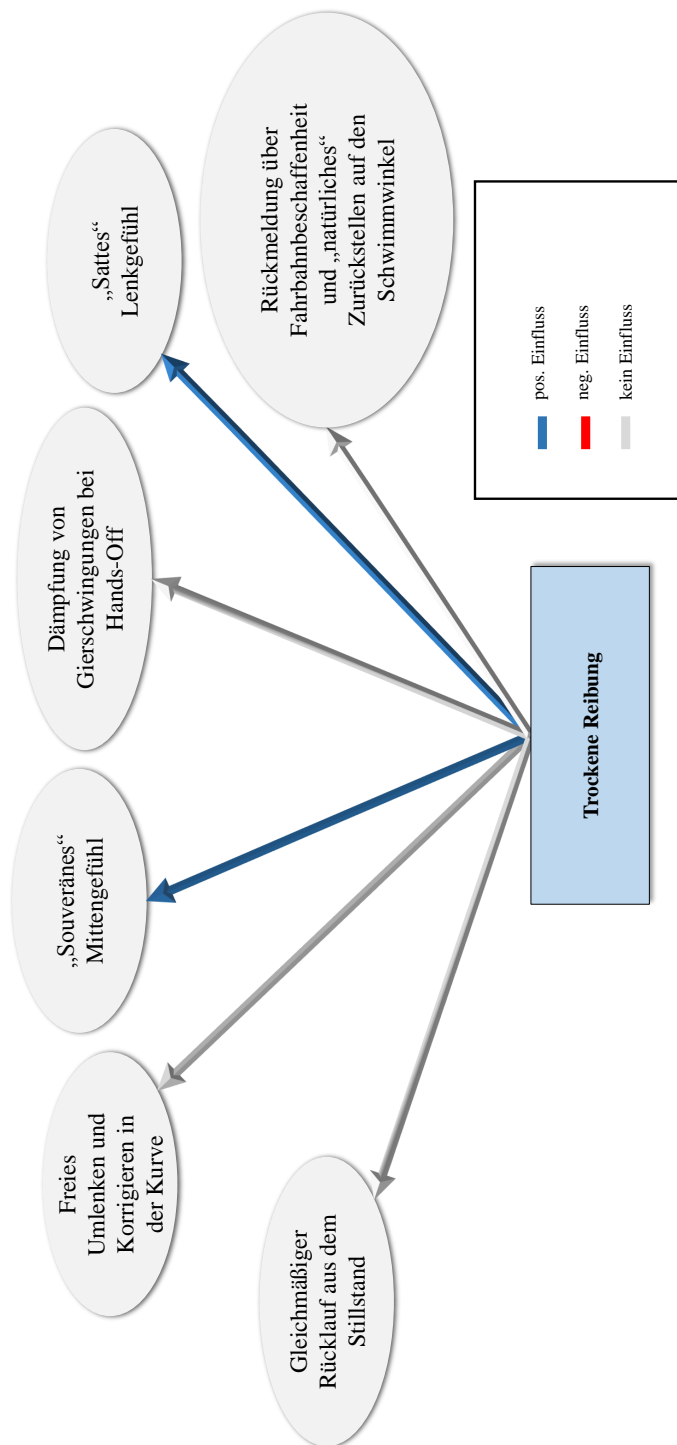


Abbildung 5.12: Einflüsse der trockenen Reibung

Über eine aktive Einstellung eines definierten Reibniveaus wird eine deutliche Verbesserung in den Aspekten der Lenksouveränität sowohl beim Mittengefühl wie auch in hochdynamischen Fahrzeugführungssituationen erreicht.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Möglichkeit zur Darstellung eines Lenkgefühls, welches unabhängig von Alterungs- und Einlaufmechanismen bleibt.

Das Konzept zur Umsetzung der gewünschten Funktionalitäten ist in Abbildung 5.13 schematisch dargestellt.

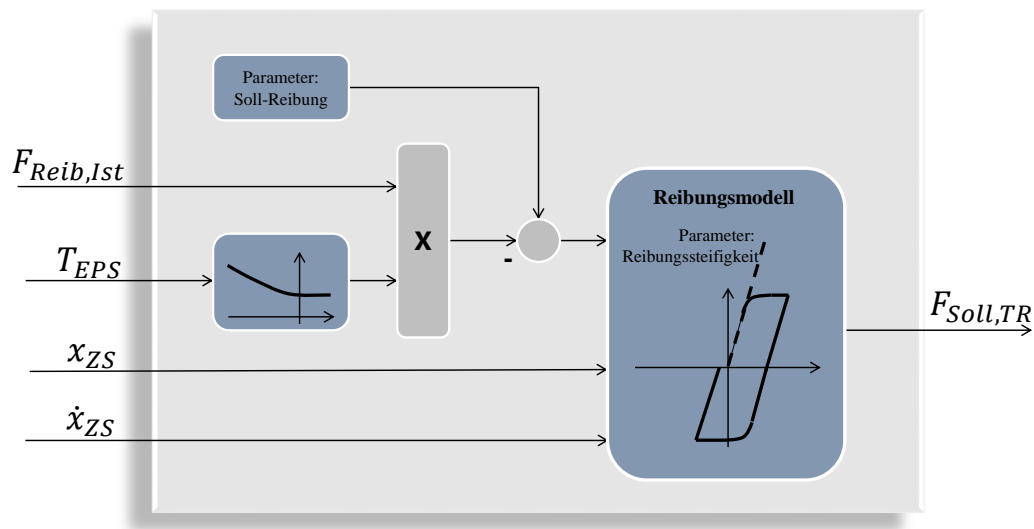


Abbildung 5.13: Trockene Reibung

Als zentraler Baustein dieses Moduls agiert ein Reibungsmodell, welches die kinetische Soll-Reibungskraft als Hysterese berechnet. Das Modell ist so aufgebaut, dass auf der Applikationsebene nur die Reibungssteifigkeit vorgegeben wird. Das zusätzlich in dem Modell benötigte Niveau der Gleitreibung wird aus dem parametrierbaren Wert für die Soll-Reibungskraft und der intern geschätzten Ist-Reibungskraft berechnet. Die Differenz dieser Größen wird als Zusatzreibungskraft von dem Modell berechnet und als Bestandteil der Gesamtstellkraft an den EPS-Motor übergeben. Um Temperatureinflüsse auf das Reibungsniveau zu berücksichtigen, wird in diesem Konzept die Ist-Reibungskraft über der intern gemessenen EPS-Temperatur skaliert.

Mit einem solchen Modul ist es möglich, bereits in der frühen Entwicklungsphase des Lenksystems sich grundlegend für ein Reibungsniveau zu entscheiden. Die Lenkgefühl-Applikation wird bereits in der Entwicklung robuster gegen interne Veränderungen im Lenksystem, welche zwischen verschiedenen Musterphasen auftreten können.

5.1.5 Zusammenfassung

Alle hier vorgestellten Lenkgefühlfunktionen besitzen das Potenzial, die fahrdynamische Abstimmung des Lenkgefühls aufgrund der reduzierten Rückwirkungen einfacher, effizienter und fahrzeugspezifischer zu gestalten. Durch gezielte Einstellung einzelner Lenkgefühlaspekte ist es möglich, die Lenk-Charakteristik so zu beeinflussen, dass mit dem gleichen Lenksystem (Hardware und Software) verschiedene Fahrzeugkonzepte mit den jeweils unterschiedlichen Kundenanforderungen bedient werden können.

In Abbildung 5.14 sind die Einflussnahmen der einzelnen Module auf die Teilbereiche des Lenkgefühls zusammengefasst dargestellt. Es wird ersichtlich, dass alle negativen Rückwirkungen konventioneller Module, wie am Anfang des Kapitels aufgezeigt, durch diese Weiter- und Neuentwicklungen der Funktionen beseitigt werden können. Des Weiteren zeigt diese Darstellung, dass alle Lenkgefühl-Funktionen keine negativen Einflüsse auf die Lenkungsrückmeldung (Informationen über den fahrdynamischen Zustand und die Fahrzeugumgebung in der Lenkung) haben.

Durch diese Trennung bei der Darstellung eines Grundlenkgefühls und der notwendigen Höhe an Rückmeldung, ist die Übertragung des Lenkgefühls als ein Charakteristikum zwischen unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten eines OEMs umsetzbar. Die Rückmeldung wird als ein weiteres Zusatzmerkmal, mit angepasster Intensität in Anlehnung an die Positionierung des Fahrzeugs, integriert.

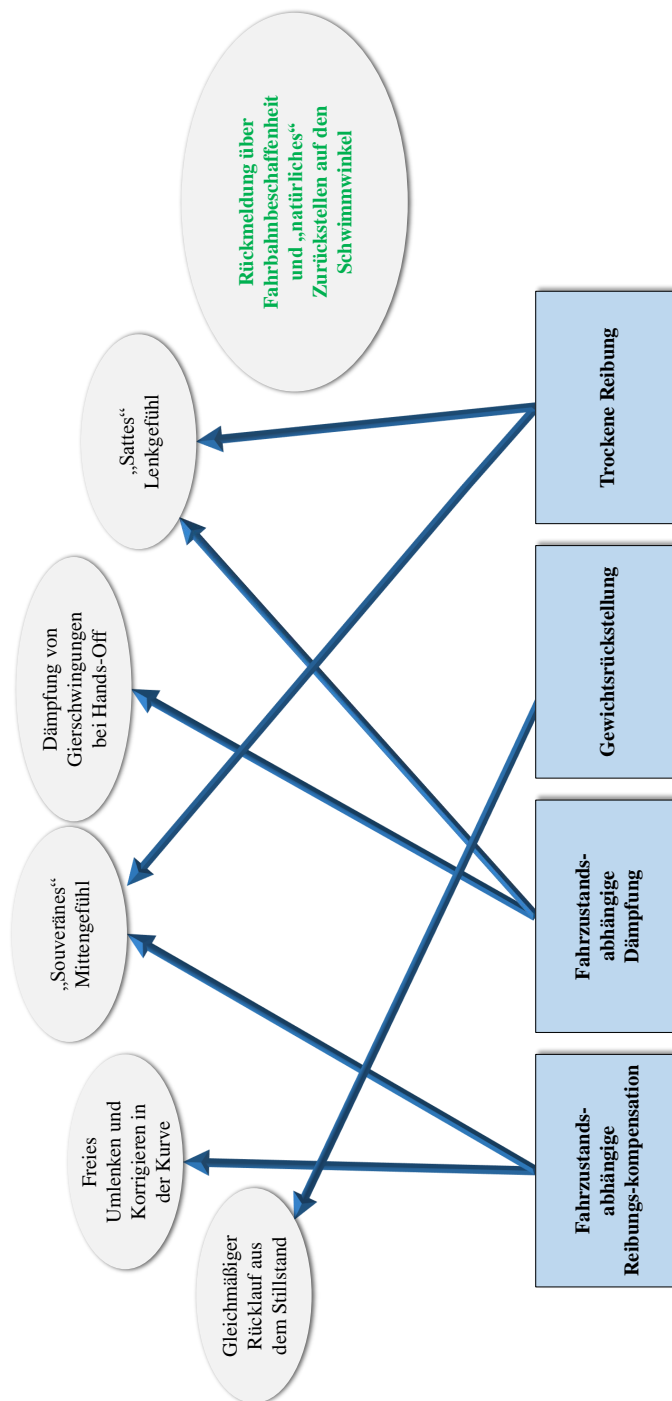


Abbildung 5.14: Applikationseinfluss fahrzustandsabhängiger Konzepte auf Lenkgefühl und Rückmeldung

5.2 Konzepte zur Darstellung der Rückmeldung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche SW-Konzepte zur Optimierung der Fahrbahnrückmeldung vorgestellt. Es werden Konzepte, Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt, um die Lenkungsrückmeldung genauso wie das Lenkgefühl anforderungsgemäß gestalten zu können.

Beim Einsatz elektromechanischer Lenksysteme in sportlich-orientierten Fahrzeugen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das Lenkgefühl und die Fahrbahnrückmeldung. Die auf dem Markt erhältliche Lenkungsmechanik stößt hierbei an ihre Grenzen. Auch die Lenkungssoftware vieler Lenksystemhersteller deckt diese Anforderungen bisher nicht im vollen Umfang ab. Um diesen Anforderungen unabhängig vom Lenkungszulieferer gerecht zu werden, wurden bei der Porsche AG ein eigenes Regelungskonzept zur Steigerung der Rückmeldung sowie zusätzliche Software-Module zur optimierten Abstimmbarkeit des Lenkgefühls entwickelt.

Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung der Rückmeldung für sportlich-orientierte Fahrzeuge erläutert und für elektromechanische Lenksysteme simulativ näher untersucht. Anschließend werden mehrere Konzepte zur Regelung von elektromechanischen Lenksystemen auf Software-Funktionsebene vorgestellt und analysiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem Porsche-eigenen Unterstützungskraftregler (UKR). Schließlich werden objektive Messungen für die verschiedenen Konzepte vorgestellt und beurteilt.

5.2.1 Definition und Objektivierung der Lenkungsrückmeldung

Die Lenkungsrückmeldung nimmt insbesondere für sportlich-orientierte Fahrzeuge eine zentrale Bedeutung ein [Hsu u. a., 2012].

Unter Lenkungsrückmeldung wird generell die Anregung verstanden, welche von der Fahrbahn über die Achse und das Lenkgetriebe bis ins Lenkrad an den Fahrer übertragen wird.

Im Komfortbereich muss die Rückmeldung so gewählt werden, dass keine unangenehme Stößigkeit empfunden wird.

Für die Sportlichkeit stellt die Rückmeldung den unmittelbaren Kontakt des Fahrers zur Fahrbahn sicher. Dies ist insbesondere im Grenzbereich wichtig. Eine transparente Lenkungsrückmeldung ermöglicht dem Fahrer, die physika-

lischen Grenzen optimal auszunutzen. “Untersteuern“ zeigt sich beispielsweise schon frühzeitig durch einen Abfall im Handmoment.

Auch unter Sicherheitsaspekten hilft die Rückmeldung dem Fahrer. Im “Übersteuern“ wird durch den physikalisch korrekten Lenkungsrücklauf gemäß der am Rad wirkenden Kräfte eine Selbststabilisierung des Fahrzeugs erwirkt.

Aufgrund der großen Bedeutung der Lenkungsrückmeldung für sportlich-orientierte Fahrzeuge wird diese nun für elektromechanische Lenksysteme genauer betrachtet.

Elektromechanische Lenksysteme bieten im Vergleich zu hydraulischen Systemen hohe Potenziale bezüglich variabel einstellbarer Funktionalität und Ausformung in der charakteristischen Wahrnehmung. Es existieren allerdings auch konzeptbedingte Einschränkungen, insbesondere im Hinblick auf die Lenkungsrückmeldung. Die hohen effektiven Massen aus der Antriebseinheit fungieren als Tiefpassfilter bei der Übertragung der von außen eingebrachten Kräfte zum Fahrerhandmoment.

Um sich diesen Effekt zu verdeutlichen und Handlungsfelder aufzudecken, wird ein vereinfachtes Lenksystemmodell nach Abbildung 5.15 aufgebaut. Das Modell beschreibt ein rein mechanisches Lenksystem, welches mit den Trägheitsmomenten eines EPS-Referenz-Systems beaufschlagt wird.

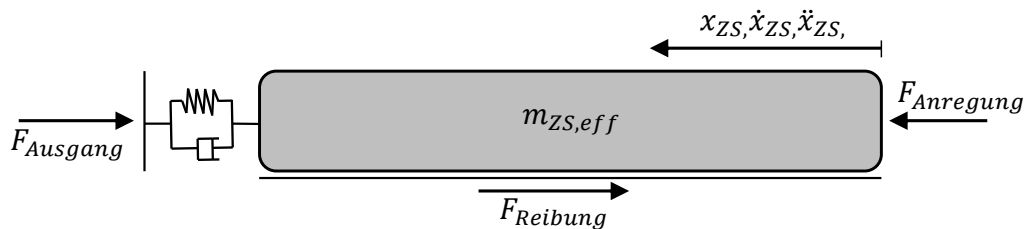


Abbildung 5.15: Einfache Modellierung zur Darstellung des Übertragungsspektrums

Das Modell wird in der Simulation mit Kräften in rückmeldungsrelevanten Frequenz- und Amplitudenbereichen angeregt und die übertragene Ausgangskraft ausgewertet.

Der Parameter $m_{ZS,eff}$ beschreibt alle auf die Zahnstange reduzierten Massen, die mit der Zahnstangenanregung überwunden werden müssen. Zusätzlich zu den Trägheitskräften wird die System-Gleitreibung $F_{Reibung}$ sowie die Elastizität und Dämpfung aus dem Drehstab in der Simulation berücksichtigt. Somit lautet die Differentialgleichung des aufgestellten Systems

$$F_{Ausgang} = F_{Anregung} - F_{Reibung} - m_{ZS,eff} \cdot \ddot{x}_{ZS} - k_{DS} \cdot \dot{x}_{ZS} - \tau_{DS} \cdot x_{ZS}. \quad (5.6)$$

Für die Berechnung der Ausgangskraft wird das System entsprechend Gleichung 5.6 gegen ein fixiertes Lenkrad verfahren. Die Parameter werden aus dem Referenz-Lenksystem übernommen.

Folgend ist der Aufbau der Anregungsvektoren beschrieben.

- Anregungsamplitude 0,2 bis 10 kN,
- Anregungsfrequenz 0,1 bis 30 Hz.

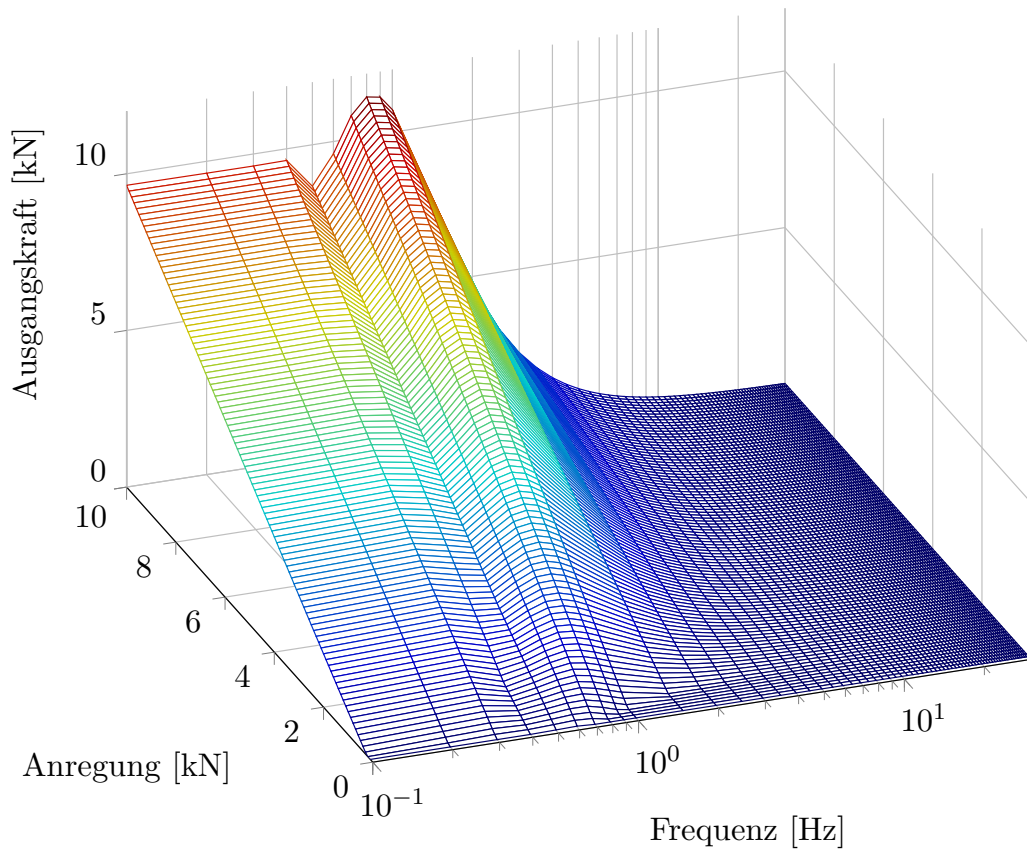


Abbildung 5.16: Übertragungsspektrum eines passiven EPS-Systems

In Abbildung 5.16 ist das damit ermittelte Übertragungsverhalten des Modells dargestellt.

Die Auswertung des Übertragungsverhaltens verdeutlicht qualitativ das hohe Maß der filternden Wirkung aus den trägen Massen eines elektromechanischen Lenksystems. Bei Anregungsfrequenzen größer als sechs Hz werden unabhängig von der Höhe der Anregungsamplitude keine oder nur niedrige Kräfte an das Lenkrad übertragen. Die Anregungsamplituden unterhalb der Systemreibung können aufgrund des haftenden Zustands vom Fahrer ebenfalls nicht wahrgenommen werden.

Im Falle existierender Anforderungen bezüglich einer hohen Rückmeldung beim Einsatz eines EPS-Lenkgetriebes, müssen die benötigten Informationen über SW-Konzepte an den Fahrer übertragen werden. Im Folgenden werden bestehende EPS-SW-Architekturen bezüglich ihrer Auswirkung auf die Bereitstellung der für den Fahrer relevanten Informationen genauer untersucht und bewertet. Derzeit wurden die unten aufgeführten Konzepte zur Lenksystemregelung bis zum Serieneinsatz umgesetzt:

- Ansteuerung der Servoeinheit,
- Handmoment-Regelung (HMR) und
- Unterstützungskraft-Regelung (UKR).

Das erste Konzept beschreibt eine Übergabe der Soll-Stellkräfte an die Antriebseinheit. Diese werden durch die motorinterne Regelung umgesetzt.

Bei der Handmoment-Regelung wird ein Soll-Handmoment bezüglich des gewünschten Lenkgefühls und der Lenksystem-Funktionalität appliziert und in der Funktionssoftware das Drehstabmoment eingeregelt.

Bei der Unterstützungskraftregelung wird, genauso wie in der reinen Ansteuerung, die Soll-Servokraft in der Applikation festgelegt. Die interne Motor-Regelung wird hierbei allerdings in einen äußeren Unterstützungskraft-Regelkreis integriert. Es wird die Kraft in der Kontaktfläche zwischen dem Motorgetriebe und der Zahnstange geregelt.

Die Rückmeldung des Lenksystems ist erheblich von der Art der Softwarearchitektur abhängig. Um die Umsetzung dieser Anforderung in der Bewertung eindeutiger abzugrenzen, wird die Funktionalität der Konzepte in zwei unterschiedlichen Lenkbetriebsarten bewertet - im Hinfad und im Rückfad.

Die Funktionsweise im Hinfad beschreibt dabei die Reaktion des Lenksystems bei einer Anregung vom Fahrer, d.h. Bereitstellung der Unterstützungskräfte vom Lenksystem und Richtungsänderung des Fahrzeugs.

$$\mathbf{x}_{EPS}(\mathbf{U}_{LR}) \neq \mathbf{0} \quad (5.7)$$

Beim Rückpfad-Betrieb wird das Verhalten der Lenksystem-Software bei einer Anregung von der Fahrbahn untersucht, was vor allem die Übertragung der Umgebungsinformationen an den Fahrer berücksichtigt. Für die Bewertung des EPS-Verhaltens im Rückpfad werden externe Anregungen angenommen, die sich in einem für das passive System bezüglich der Rückmeldung ungünstigen Frequenzbereich befinden, d.h.

$$M_{DS}(F_{Extern}) \approx 0. \quad (5.8)$$

5.2.2 Konventionelle Regelungsansätze der EPS

Ansteuerung der Servoeinheit

Bei Aufbau der Funktionssoftware nach dem Prinzip einer reinen Ansteuerung der Unterstützungseinheit wird ein Soll-Motormoment auf der obersten SW-Ebene an die interne Motorregelung übergeben. Die angeforderten Sollkräfte werden in der Parametrierung des Lenksystems in Abhängigkeit von den Lenkungs- und Fahrzeugmessgrößen zusammengesetzt. So kann zum Beispiel die Unterstützungskraft in Abhängigkeit von gemessenem Drehstabmoment und Fahrzeuggeschwindigkeit appliziert werden. Vor der Übergabe an den Motorregler werden die Soll-Kräfte durch Überwachungsfunktionen auf Plausibilität und Beherrschbarkeit durch den Fahrer überprüft.

Zunächst wird dieses Konzept bezüglich der Funktionalität im Hinfad bewertet. In Abbildung 5.17 ist der Wirkungspfad aus der SW-Funktionsicht bei einer Anregung des Lenksystems durch den Fahrer dargestellt.

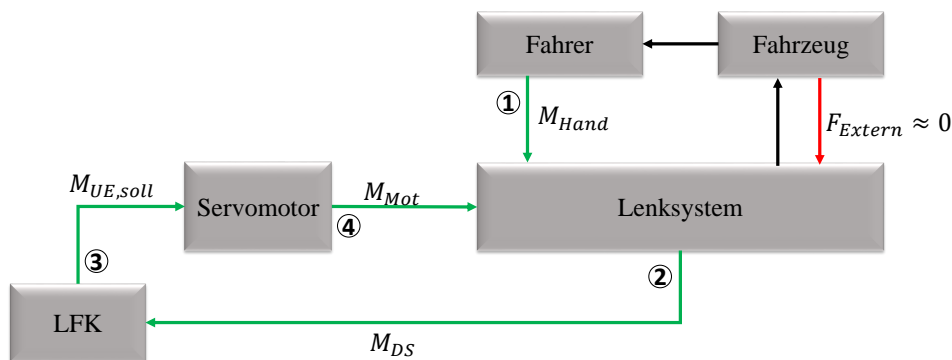


Abbildung 5.17: Funktionsweise einer Servo-Ansteuerung im Hinfad

Im Schritt 1 erfolgt eine infinitesimal kleine Lenkbewegung durch den Fahrer,

welche im nächsten Schritt unter anderem über eine Änderung des gemessenen Drehstabmoments in der Lenksystem-Software detektiert wird. Mit dieser Änderung des Drehstabmoments werden in den internen Lenkfunktionen (LFK) applikativ eingestellte Motor-Sollmomente $M_{UE,soll}$ berechnet und an die Servomotorregelung übergeben. Die Servoeinheit regelt die Unterstützungsmomente ein und ein gewünschtes Lenkverhalten des Fahrzeugs kann erreicht werden. Es wird deutlich, dass mit diesem Funktionsprinzip keinerlei Nachteile in der Bereitstellung der Unterstützungskraft entstehen - es können Lenkfunktionen umgesetzt werden und appliziertes Lenkgefühl durch das Lenksystem eingeregelt werden. Als nächstes wird dieses Konzept bezüglich des Verhaltens bei einer externen Anregung prinzipiell untersucht. Das SW-Verhalten wird in einer Situation des Geradeaus-Fahrens, d.h. keine Manipulation des Lenksystems durch den Fahrer, mit einer plötzlichen Anregung aus der Fahrbahn untersucht. Das Manöver ist vergleichbar mit einer Kantenüberfahrt bei Geradeausfahrt.

Der Funktionsfluss bei einem solchen Fahrmanöver ist in der folgenden Abbildung 5.18 gezeigt.

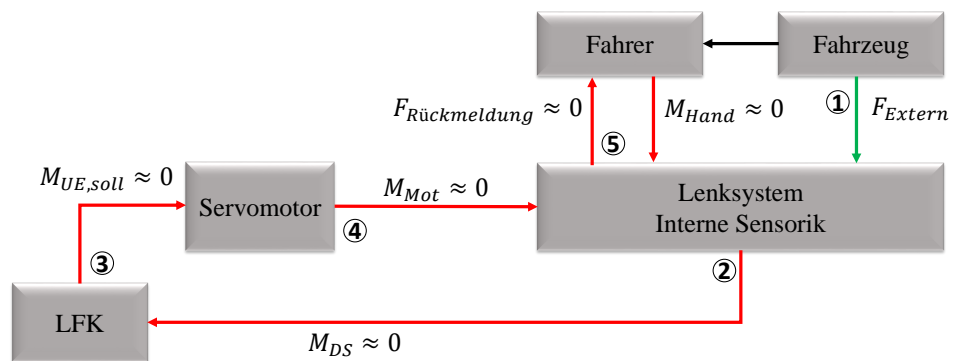


Abbildung 5.18: Funktionsweise einer Servo-Ansteuerung im Rückpfad

Wie bereits beschrieben, wird in das System ein Anregungsimpuls von der Fahrbahn eingeleitet (Schritt 1). Die Amplitude und die Frequenz dieser externen Kraft wird in der Höhe so angenommen, dass bei einer gleichen Anregung in einem passiv geschalteten System vernachlässigbar kleine Änderungen der EPS-internen Zustände stattfinden würden, vgl. Abbildung 5.16.

Im Moment der Anregung befindet sich das Lenksystem in einem Ruhezustand - ohne Auslenkung durch den Fahrer und ohne messbarem Drehstabmoment. Weil sich auch durch die externe Kraft die internen Größen nur minimal ändern, bleiben diese Messgrößen auch während der Anregung un-

verändert (Schritt 2). Durch die direkte Abhängigkeit der Lenkfunktionen von den internen Messgrößen, werden in diesem Zustand keine relevanten Motor-Sollmomente angefordert. Dadurch, dass auch durch den Motor keine aktive Manipulation des Lenksystems stattfindet, bleibt das Handmoment des Fahrers während und nach dem externen Impuls unverändert.

Mit dieser Bewertung kann festgestellt werden, dass EPS-Systeme mit der Funktionsstruktur einer Servo-Ansteuerung im Übertragungsverhalten die gleichen Einschränkungen wie ein passives EPS-Lenksystem aufweisen. Die Rückmeldung hängt hierbei direkt mit den mechanischen Eigenschaften des Systems zusammen und ist im Regelfall unzureichend.

Zur Vergleichbarkeit dieses Funktionskonzepts gegenüber rückmeldungssteigernden Regelungskonzepten wurde das System zur Darstellung des Übertragungsverhaltens über der Frequenz an einem Lenksystemprüfstand untersucht. Bei diesem Versuch wird die Zahnstange des Lenksystems an einer Seite mit einem Linearaktuator verbunden. Die Lenksäule mit dem Lenkrad bleibt dabei frei schwingend. Über den Linearaktuator wird ein Sinus-Sweep mit einer konstanten Amplitude von 600 N und Frequenzen von 1 bis 30 Hz aufgebracht. Anschließend wird die Übertragung zwischen den aufgeprägten Kräften und dem gemessenen Drehstabmoment berechnet.

Der ausgewertete Amplitudengang des Referenz-Lenksystems mit der konventionellen Motor-Ansteuerung ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

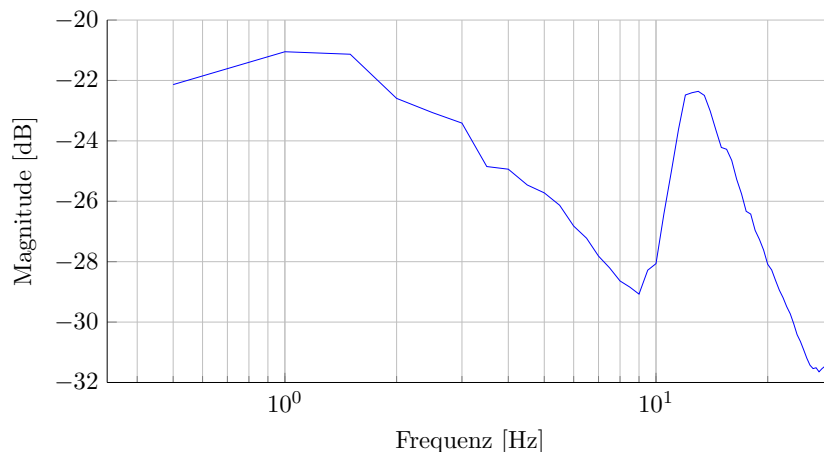


Abbildung 5.19: Amplitudengang eines konventionell angesteuerten EPS-Systems

Man erkennt in der Abbildung, dass die Übertragungsverstärkung bereits ab einer Frequenz von ca 2 Hz bis ca 9 Hz stark abnimmt. Bei der Frequenz

13 Hz wird ein starker Anstieg des Amplitudengangs ersichtlich. An dieser Stelle liegt die Resonanzfrequenz des aktiven Lenksystems.

EPS-Systeme mit einer reinen Ansteuerung der Antriebseinheit stellen sich somit als weniger geeignet für Fahrzeuge mit einem hohen Anspruch an Natürlichkeit und Transparenz im Lenkgefühl dar.

Der Vorteil solcher Systeme besteht in der kostengünstigen Entwicklung und der generischen Übertragbarkeit, aufgrund des einfachen Konzepts. Die Funktionssoftware bleibt bezüglich Dynamik und Stabilität weitgehend unabhängig von der wechselnden Lenktriebmechanik und gegenüber einem unterschiedlichen Fahrzeugaufbau robust.

Existiert allerdings der Anspruch, die Charakterausprägung des Gesamtfahrzeugs in Richtung Sportlichkeit und Natürlichkeit über das Lenksystem zu vermitteln, so müssen SW-technische Lösungen zur Hardware-unabhängigen Steigerung der Rückmeldung in die Funktionssoftware integriert werden. Zwei solcher Konzepte werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

Regelung des Handmoments

Ein Konzept zur Regelung der Stellkräfte auf der High-Level-Softwareebene bei einem EPS-Lenkgetriebe ist die Handmomentregelung (HMR), wie in [Hsu u. a., 2012] beschrieben. Hierbei wird über die Applikation der Funktionsmodule ein Soll-Handmoment $M_{DS,soll}$ definiert und anschließend das Fahrerhandmoment darauf eingeregelt. In der LenkgefühlAbstimmung wird dieses Soll-Handmoment in Abhängigkeit von externer Zahnstangenkraft und Fahrzeuggeschwindigkeit festgelegt.

Das Konzept der Handmomentregelung setzt einen Algorithmus zur Berechnung der Zahnstangenkraft in der Software voraus. Da die berechnete Zahnstangenkraft zur Darstellung der Soll-Handmomente in der Grundunterstützung herangezogen wird und der größte Anteil des Lenkgefühls davon abhängt, darf die Abweichung der berechneten Zahnstangenkräfte von der Realität nur sehr gering sein.

Die Schätzung der einwirkenden externen Kräfte erfolgt über einen Beobachteransatz (ZKB). Ein mögliches Konzept zur Umsetzung eines solchen Zahnstangenkraftschätzers nach einem Beobachterkonzept wird in Kapitel 5.3.2 genauer vorgestellt.

In Abbildung 5.20 ist die Funktionsweise einer solchen Software-Struktur im Hinfad dargestellt.

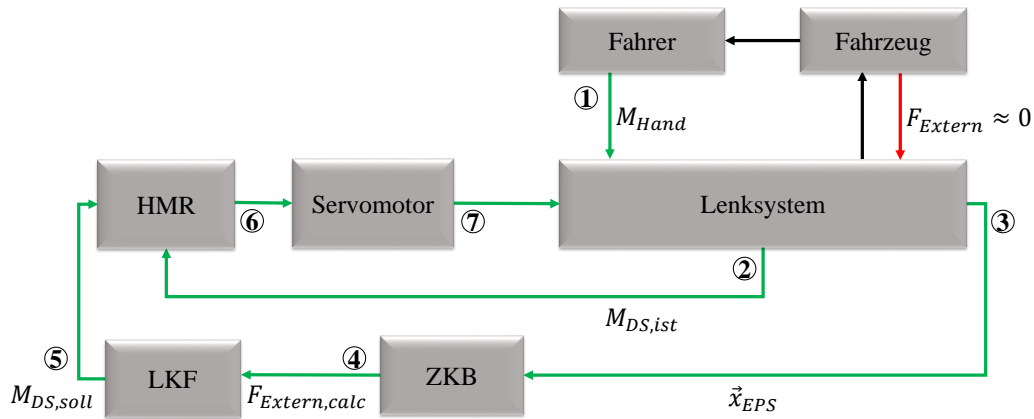


Abbildung 5.20: Funktionsweise der Handmomentregelung im Hinfad

In der Bewertung wird erneut ein Zustand mit einer Impuls-Anregung des Lenksystems über das Lenkrad betrachtet (Schritt 1). Die externe Kraft wird zum Zeitpunkt der Lenkradanregung zu Null angenommen (Schritt 3). Durch die Auslenkung ergibt sich ein Ist-Drehstabmoment $M_{DS,ist} \neq 0$ und das Soll-Handmoment $M_{DS,soll} = 0$, weil in diesem Moment keine externen Kräfte anliegen und das Soll-Moment über der berechneten Zahnstangenkraft in den Lenkfunktionen zusammengesetzt wird (Schritt 5). Der Regler HMR wird demnach im Schritt 6 versuchen das Soll-Handmoment $M_{DS,soll}$ als Führungsgröße einzuregeln und übergibt eine handmomentreduzierende Soll-Kraft $F_{soll,HMR}$ an die motorinterne Basisregelung.

Somit wirkt der Regler im Anlenkvorgang agilisierend und die Funktion der Servo-Unterstützung im Hinfad ist durch dieses Konzept sichergestellt.

Um auch die Handmoment-Regelung bezüglich des Rückmeldungsverhaltens zu untersuchen, wird das Konzept ebenfalls nach dem Rückpfad-Prinzip bewertet. Der dabei stattfindende Funktionsfluss ist in Abbildung 5.21 aufgezeigt.

Das System wird im ersten Schritt in gleicher Weise wie zuvor vorgestellt mit einer schlagartigen externen Kraft beaufschlagt. Das Handmoment liegt zu diesem Zeitschritt bei 0 Nm. Dementsprechend befindet sich der vom Drehstabmomentsensor erfasste Wert ebenfalls bei circa 0 Nm, $M_{DS,ist} \approx 0$. Allerdings wird die aufgebrachte Kraft F_{Extern} durch die sich minimal ändernden Systemzustände im ZKB zu $F_{Extern,calc}$ berechnet und den Lenkfunktionen bereitgestellt. In den Funktionsmodulen wird im nächsten Schritt ein Soll-Handmoment $M_{DS,soll}$ generiert und als Führungsgröße an den Regler übergeben. Weil zu diesem Zeitpunkt die Regelgröße $M_{DS,ist}$ 0 Nm beträgt, wird

infolge der Übergabe der Stellgröße $F_{soll,HMR}$ an den Servomotor das Handmoment beim Fahrer entsprechend der Applikation in den Funktionsmodulen verändert. Die externe Anregung wird demnach in Form von Rückmeldung vom Fahrer wahrgenommen.

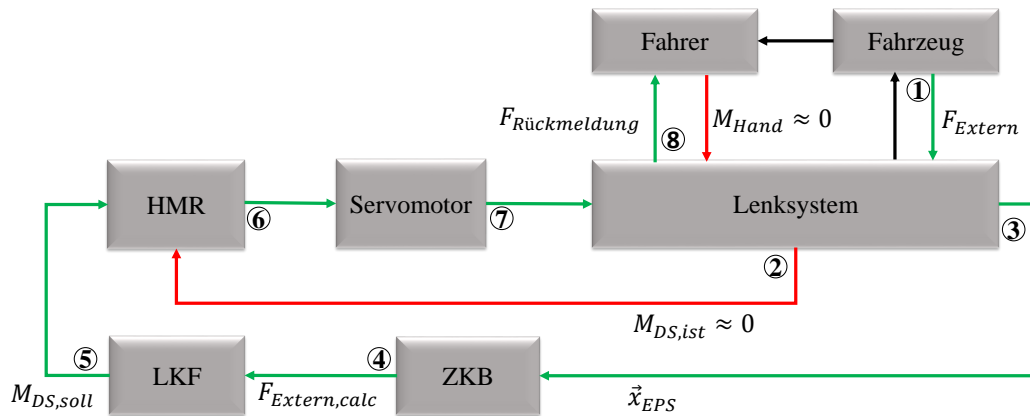


Abbildung 5.21: Funktionsweise der Handmomentregelung im Rückpfad

Mit diesem Konzept ist eine Bereitstellung der Information über Fahrbahnanregungen an den Fahrer möglich. Der Frequenzinhalt und die Unmittelbarkeit der rückgemeldeten Informationen kann mit einer solchen Architektur in der Entwicklung des Beobachters und der Reglersynthese berücksichtigt werden. Bezüglich dieser Kriterien kann die Rückmeldung losgelöst von der Parametrierung der Funktionsmodule abgestimmt werden. Es muss allerdings beachtet werden, dass die Natürlichkeit dieser Informationen auch stark mit dem Amplitudenverlauf des Handmoments über der Anregung zusammenhängt und sich dementsprechend in starker Abhängigkeit mit der Applikation der Soll-Handmomente über der externen Kraft befindet. Somit ist eine Trennung der Lenkgefühl-Applikation von der Darstellung der Rückmeldung mit diesem Konzept nicht im vollen Umfang möglich.

Um die Güte der Rückmeldungsdarstellung im Vergleich zu dem zuvor bewerteten EPS-Ansteuerungskonzept zu bewerten, wurde ein Lenkgetriebe mit einer Handmomentregelung denselben Tests zur Objektivierung der Rückmeldung unterzogen. Die Amplitudengänge dieser Konzepte sind in Abbildung 5.22 gegenübergestellt.

Es muss bei der Darstellung beachtet werden, dass die verglichenen Lenksoftware-Konzepte sich stark in der eingesetzten Hardware und der Applikationsumgebung unterscheiden, da sie von zwei unterschiedlichen Lenksystemlieferanten entwickelt wurden. Es kann allerdings dennoch ein qualitati-

ver Vergleich angestellt werden, weil das HMR-Lenkssystem trotz geringerer Reibung eine um ca. 30 % höhere effektive Masse aus der Trägheit auf der Zahnstange aus dem Servo-Antrieb aufweist.

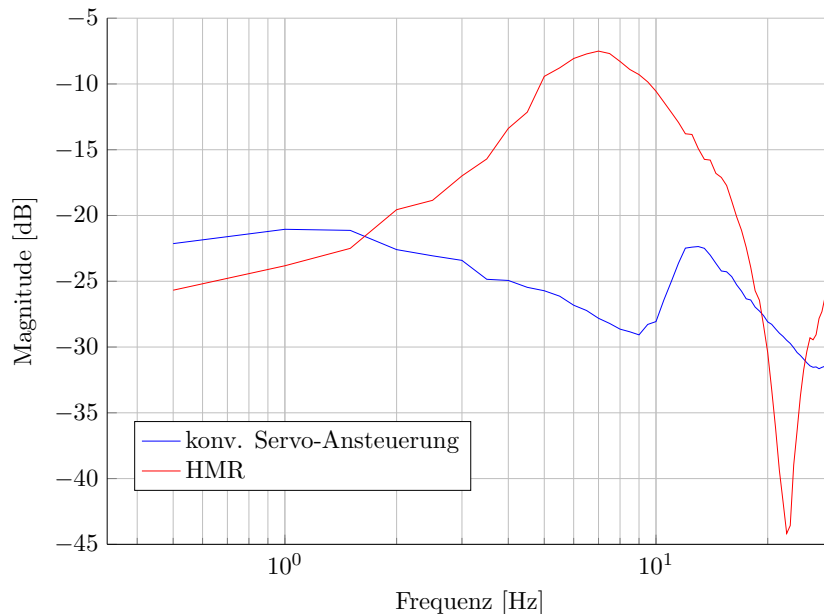


Abbildung 5.22: Übertragungsverhalten HMR vs. konventionell angesteuertes System

Es wird deutlich, dass das System mit der Handmomentregelung eine deutliche Anhebung der Amplitudenverstärkung bis zu einer Frequenz von ca. 15 Hz darstellt. Dieser Bereich deckt die Übertragung aller für den Fahrer wichtigen Nutzinformationen ab. Da sich ab 15 Hz hauptsächlich Störinformationen auf das Lenksystem auswirken, wird die Übertragung in diesem Bereich aufgrund der frequenzbezogenen Reglerauslegung deutlich abgesenkt.

Die Höhe und der Verlauf der Amplitudenverstärkung im Bereich der Nutzinformationen wird während des Abstimmungsprozesses in unterschiedlichen Fahrdynamik-Manövern mithilfe der Veränderungen in der Reglerparametrierung anhand der Anforderungen an das Lenkverhalten und -empfinden angepasst.

Die Übertragung dieses Konzepts auf Lenkgetriebe mit geänderter Hardware und in andere Fahrzeuge gestaltet sich prinzipbedingt relativ aufwendig. Die Auslegung des Zahnstangenkraftbeobachters und vor allem die Abstimmung des Reglers stellen einen erheblichen Entwicklungsaufwand bei der Erst-Umsetzung dieses SW-Konzepts auf einem neuen Lenkgetriebe sowie bei

Adaption in ein anderes Fahrzeug dar. Allerdings ermöglicht diese Entwicklung, eine marken-, fahrzeug- und derivativespezifische Lenkungsrückmeldung für den Kunden bereitzustellen.

5.3 Unterstützungskraftregelung (UKR)

In diesem Kapitel wird das Regelungskonzept beschrieben, welches den Hauptbestandteil der Untersuchungen bei Erstellung dieser Arbeit darstellte.

Die Unterstützungskraftregelung stellt sich als äußerst geeignet für Lenkgetriebe mit Einsatz in sportlich-orientierten Fahrzeugen dar. Das mögliche Einsatzspektrum reicht von der Steigerung der Rückmeldung in Kundenfahrzeugen bis zur Optimierung des Lenkgefühls im Motorsportbetrieb.

Im ersten Teil des Kapitels wird das Funktionsprinzip der Regelungsarchitektur mit Wirkungsweisen im Hin- und Rückpfad dargestellt. Folgend wird das Konzept des Zahnstangenkraftschätzers als grundlegendes Element der Unterstützungskraftregelung erläutert, anschließend werden die Validierungsergebnisse vorgestellt und weitere Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Abschließend wird genauer auf die Auslegung des Reglers im Zusammenhang mit der Darstellung des erforderlichen Informationsgehaltes im Lenkrad eingegangen und die Objektivierung der Maßnahmen auf Simulations-, Prüfstands- und Fahrzeugebene anhand von Amplitudengängen in Bode-Diagrammen dargestellt.

Alle Untersuchungsergebnisse auf System- und Fahrzeugebene entstanden unter Verwendung eines Referenzlenkgetriebes bzw. -fahrzeugs. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf sonstige Lenksysteme und Fahrzeuge stellt stets eine Hauptanforderung bei der Konzeptentwicklung dar und ist über vorgesehene Applikationsparameter in den einzelnen SW-Modulen gegeben.

5.3.1 Konzept

Beim UKR-Konzept soll die applikativ dargestellte Lenkgefühl-Parametrierung eingeregelt werden. Ausgehend vom Konzept mit der reinen Ansteuerung der Servoeinheit, wird in diesem Fall nicht das Motorsollmoment $M_{Mot,soll}$ sondern die tatsächlich anliegende Unterstützungskraft $F_{UE,soll}$ an der Schnittstelle Motorgetriebe-Zahnstange über die Applikation der Lenkgefühlmodule eingestellt, vgl. Abbildung 5.23.

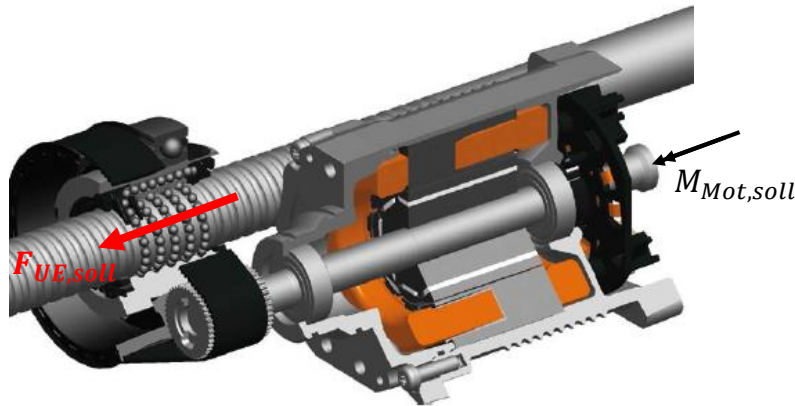


Abbildung 5.23: Soll-Unterstützungskraft im Schnittbild

Der Hauptunterschied zu dem konventionellen Ansatz besteht dementsprechend darin, dass die dynamischen Kraft-Einflüsse der Antriebseinheit in der Soll-Unterstützungskraft berücksichtigt werden. Diese Einflüsse bestehen aus den passiven Massen des Motors und des Getriebes sowie der Antriebsreibung und werden über einen Zahnstangenkraftschätzer als Ist-Zustand berechnet. Dadurch, dass diese Faktoren den größten Anteil an der Abschwächung der Fahrbahnrückmeldung darstellen, wird durch eine exakte Berechnung und Berücksichtigung dieser Größen in der Stellanforderung eine maximale Transparenz der externen Kraftdynamik in der Fahrerwahrnehmung möglich. Weil diese maximale Transparenz für den Kundenbetrieb unerwünscht ist, werden über eine geeignete Reglerauslegung die Frequenzbereiche der externen Anregung in Nutz- und Störinformationen unterteilt und diese entsprechend im Übertragungspfad verstärkt bzw. abgeschwächt. Durch eine solche gezielte Reglerparametrierung wird die Rückmeldungsfreudigkeit eines rein mechanischen Lenksystems mit den Vorteilen eines beliebig steuerbaren EPS-Lenkgetriebes kombiniert.

Wie bereits bei den vorher beschriebenen EPS-SW-Konzepten soll die Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung ebenfalls anhand der Betriebsmodi Hin- und Rückpfad erläutert werden. Dadurch wird die Vergleichbarkeit unter den Konzepten gewährleistet.

Abbildung 5.24 stellt die Funktionsweise des UKR-Konzepts im Hinpfad dar. Es erfolgt eine Anregung des Lenkrads durch den Fahrer, ohne dass in diesem Moment relevante Kräfte aus der Fahrbahn auf das Lenksystem wirken (Schritt 1). Über die Veränderung der lenkungsinternen Zustände werden die Lenkfunktionen aktiv und fordern in Schritt 3 ein bestimmtes Soll-Unterstützungsmoment $M_{UE,soll}$ an. Parallel wird im Zahnstangenkraftbeob-

achter ein Ist-Unterstützungsmoment abgeschätzt (Schritt 4), welches in der betrachteten Situation dem Soll-Moment gleicht. Aufgrund dieser Gleichheit ergibt sich im Regler keine Regeldifferenz. Dementsprechend wird keine Reglerverstärkung $M_{UKR,soll}$ an den Servomotor übergeben. Somit wird in Schritt 6 durch die Motor-Regelung allein die aus Vorsteuerung resultierende Kraft $M_{UE,soll}$ gestellt und der Fahrer während des Auslenkvorgangs entsprechend unterstützt.

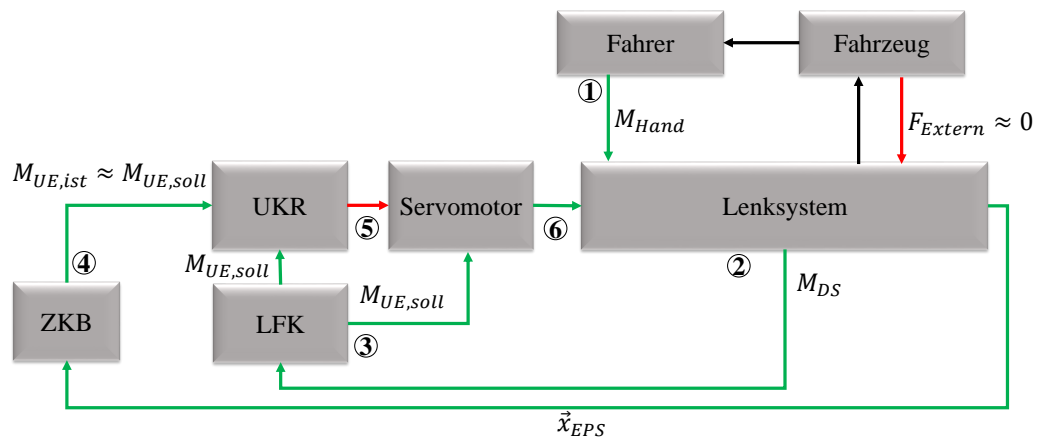


Abbildung 5.24: Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung im Hinfad

Die Betrachtung ergibt, dass die grundlegende Servo-Funktion des Lenksystems mit dem UKR-Konzept dargestellt wird. Zusätzlich ergibt sich, dass hierbei der Funktionsfluss im UKR-Betrieb keinerlei Unterschiede zum Prinzip der reinen Servo-Ansteuerung aufweist, welches sich im Hinfad-Betrieb als ein optimales Konzept bezüglich der Funktionsarchitektur und Applikation erwiesen hat.

Nachdem die Wirkungsweise des UKR-Konzepts im Hinfad nachgewiesen wurde, soll die Funktionsweise im Rückpfad untersucht werden. Abbildung 5.25 stellt den Funktionsfluss der Architektur bei einer plötzlichen Zahnstangenanregung über die Fahrbahn dar.

Wie bisher angenommen, erfolgt ein Kraftimpuls auf die Zahnstange bei einem stillstehenden Lenkrad. Weil aufgrund der blockierenden Massen und der Reibung keine Auslenkung des Lenkrads stattfindet, ist in diesem Zeitpunkt das messbare Drehstabmoment M_{DS} bei 0 Nm und die momentabhängigen Lenkfunktionen sind entsprechend deaktiviert.

Das Soll-Unterstützungsmoment $M_{UE,soll}$, welches zusätzlich zu der Vorsteuerung in den UKR als Führungsgröße eingeht und an der Zahnstange eingestellt werden soll, entspricht ebenfalls 0 Nm.

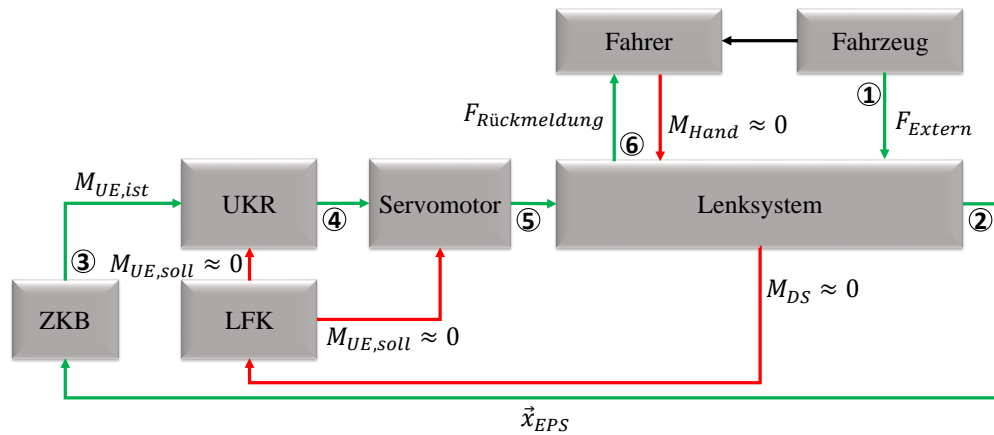


Abbildung 5.25: Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung im Rückpfad

Im ZKB wird in Schritt 3 ein Ist-Unterstützungsmoment $M_{UE,ist}$ berechnet. Dieses Moment ergibt sich aufgrund der infinitesimal kleinen Änderungen in den messbaren Motorzuständen φ_{Mot} und $\dot{\varphi}_{Mot}$, die mit der externen Anregung einhergehen (Schritt 2) und entspricht der blockierenden Kraft bestehend aus den Massenträgheiten und der Reibung in der Antriebseinheit.

Die Regeldifferenz gleicht demnach dem Ist-Unterstützungsmoment. Mit der Reglerverstärkung wird im nächsten Schritt das UKR-Moment $M_{UKR,soll}$ an die Motorregelung als Stellgröße übergeben, ein Sollmoment von 0 Nm an der Schnittstelle Getriebe-Zahnstange eingeregelt und die externe Fahrbahnanregung für den Fahrer spürbar (Schritte 4-6).

Es wird deutlich, dass sobald die Anregung des Systems oberhalb der Haftreibung in der Zahnstangenführung liegt und es zu einer Bewegung der Antriebseinheit kommt, die Information mit beliebig einstellbarer Güte an den Fahrer weitergeleitet werden kann. Der Frequenzinhalt, die Phasentreue und die Verstärkung der weitergeleiteten Informationen hängen hierbei stark von der Güte der Zahnstangenkraftberechnung ab.

Den wichtigsten Einflussfaktor auf die frequenzabhängige Verstärkung, die Robustheit und die Stabilität des Systems stellen die Auslegung des verwendeten Reglers sowie die Umsetzung des Konzepts dar.

Einen großen Vorteil dieses Konzepts bezüglich Systemstabilität und Robustheit stellt die Integration des vorgesteuerten Kraftanteils dar, so dass der Regler nur korrigierend agiert und nicht das gesamte Kraftniveau regelt, wie das bei der Handmomentregelung der Fall ist. Die Höhe der Regelabweichung hängt von der Höhe der resultierenden Blockiermomente aus der Antriebsein-

heit und nicht vom applizierten Unterstützungsniveau des Gesamtsystems ab.

In Abbildung 5.26 wird das Übertragungsverhalten eines UKR-Lenksystems im Vergleich mit der konventionellen Ansteuerung dargestellt. Die beiden SW-Architekturen wurden jeweils auf demselben Referenz-Lenkgetriebe integriert und das Gesamtsystem wie bereits vorgestellt am Prüfstand mit einem Sinus-Sweep an der Zahnstange (Amplitude 600 N, Frequenze 1-30 Hz) angeregt. Zusätzlich wurden in der UKR-Konfiguration zwei unterschiedliche Lenkgefühl-Abstimmungen miteinander verglichen.

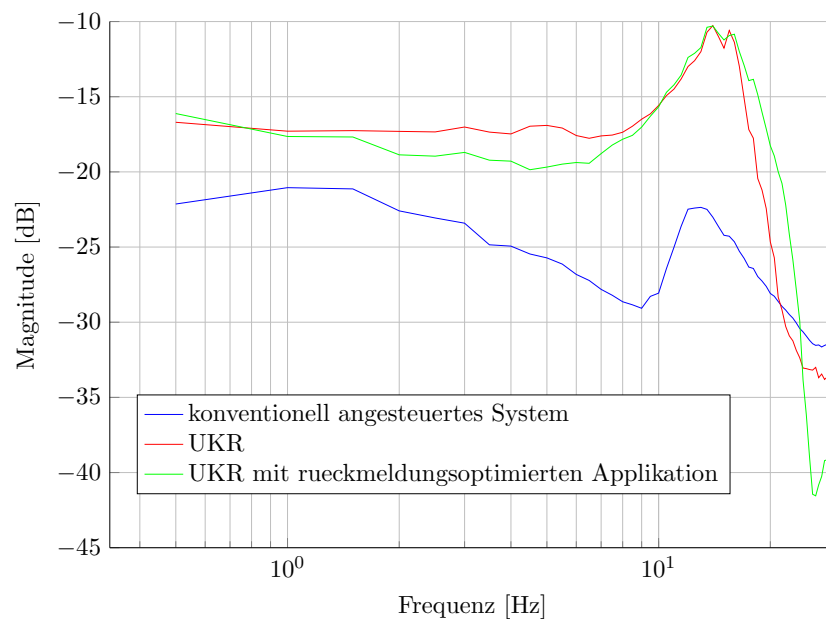


Abbildung 5.26: Übertragungsverhalten UKR vs. konventionell angesteuertes System

Die Anpassung der Applikation in Richtung höherer Rückmeldung wurde ausschließlich auf der Ebene der Lenkgefühl-Funktionsmodule durchgeführt. Die Parametrierung des Reglers und des Zahnstangenkraftbeobachters ist in beiden Konfigurationen identisch.

Bei der rückmeldungsoptimierten Applikation wurden folgende Anpassungen in der Parametrierung durchgeführt:

- Erhöhung der Reibungskompensation,
- Absenkung der Dämpfung,

- Absenkung der Grundunterstützung um 20 % und
- Reduktion der Systemreibung über trockene Reibung.

In dem Anregungsspektrum von 7 bis 15 Hertz befinden sich die für den Fahrer notwendigen Nutzinformationen. Um diese Anregungen dem Fahrer über die Lenkung mitzuteilen, wird durch den UKR die Amplitudenverstärkung in diesem Bereich deutlich überhöht. Die Höhe und der genaue Verlauf dieses Anstiegs werden im Fahrversuch ermittelt und in der Auslegung berücksichtigt. Die Grenzen werden hierbei durch den gewünschten Fahrkomfort und die Systemstabilität gesetzt.

Ab der Frequenz von 15 Hertz wird, wie in der Auswertung ersichtlich, die Rückmeldung mit einem hohen Gradienten zurückgenommen, um die nicht benötigten Störinformationen aus dem Handmoment herauszufiltern. Dadurch wird in erster Linie der Lenkkomfort erhöht, aber auch das Führungsverhalten und die Lenkpräzision verbessert.

Bei einem Vergleich des Amplitudengangs des Handmomentreglers aus Abbildung 5.22 mit dem des Unterstützungskraftreglers wird ein sehr unterschiedlicher Verlauf ersichtlich. Dieser Unterschied basiert auf den abweichenden Auslegungskriterien der unterschiedlichen Fahrzeuge, in denen die Regler ihren Einsatz finden sowie auf stark abweichenden Mechanik-Konzepten der untersuchten Lenkgetriebe. Jedoch zeigen beide Regler ihre Möglichkeit, die Rückmeldung in den relevanten Frequenzbereichen deutlich gegenüber der reinen Ansteuerung zu steigern.

5.3.2 Integration und Optimierung des Zahnstangenkraftbeobachters

Das Regelungskonzept des Unterstützungskraftreglers basiert auf einer genauen Kenntnis der momentan vorherrschenden Zahnstangenkraft, speziell an der Kontaktstelle zwischen Kugelumlaufgetriebe und Zahnstange. Weil aus wirtschaftlichen Aspekten auf einen entsprechenden Sensor verzichtet werden soll, wurde in dem vorgestellten Regelungskonzept eine Zahnstangenkraftbeobachter (ZKB) zur Berechnung der an der Unterstützungseinheit wirkenden Kräfte eingesetzt. In der folgenden Darstellung ist schematisch das Konzept des integrierten Zahnstangenkraftschätzers dargestellt.

Das Gesamtkonstrukt basiert auf einem zeitvarianten Kalman-Filter, welchem ein Zustandsraummodell der Antriebseinheit zugrunde liegt. Hierbei wird das notwendige Unterstützungsmoment inklusive des Reibungsmoments

festgelegt. Nachgeschaltet wird dann dieses Berechnungsergebnis um das Reibungsmoment bereinigt, und das Ergebnis $M_{UE,ist}$ dem Regler als Regelgröße übergeben. Die Reibung der Servo-Einheit wird parallel zum Kalman-Filter in einem Reibungsmodell berechnet.

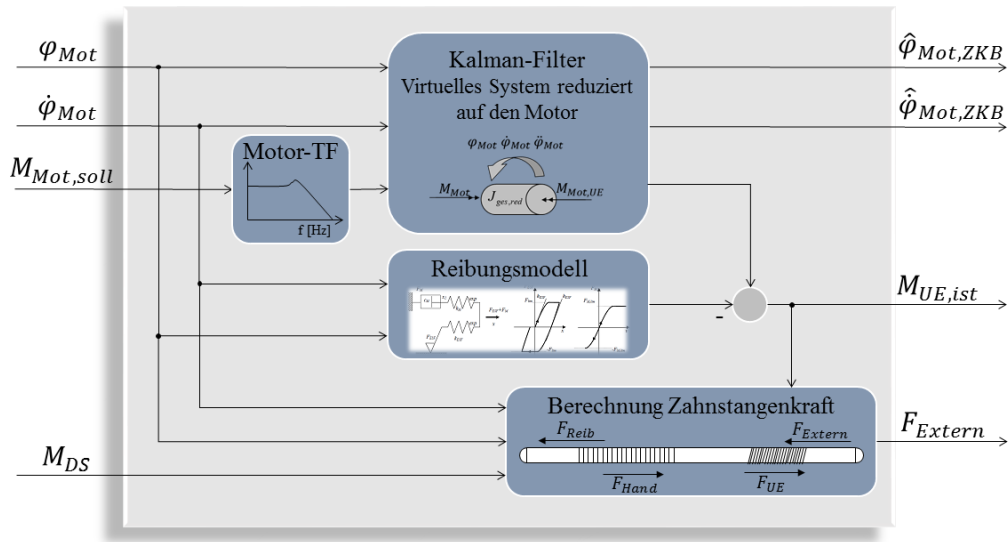


Abbildung 5.27: Konzept des Zahnstangenkraftbeobachters für UKR

Neben der Berechnung der Ist-Unterstützungskraft wird im ZKB die extern auf das Lenksystem wirkende Kraft F_{Extern} berechnet. Diese dient in der Entwicklungsphase des Zahnstangenkraftschätzers zur Validierung der richtigen Berechnung der Unterstützungskraft. Hierbei werden die Spurstangen des Lenksystems mit Dehnmessstreifen beklebt und die Summe dieser gemessenen Kräfte mit der berechneten Kraft F_{Extern} verglichen. In Abbildung 5.28 ist ein Beispiel einer solchen Messung dargestellt.

Die Messung zeigt ein Zulenken bis zum “Untersteuern“ auf einem Untergrund mit sehr geringem Reibwert, kleiner als 0,1 (vereister See), und verdeutlicht die derzeit maximal mögliche Schätzung eines Beobachters auf einem aktuellen Steuergerät. Die externe Kraft wird bis zu Frequenzen von 25 Hz mit einer ausreichenden Güte berechnet.

Ein weiteres Modul in dem Zahnstangenkraftschätzer ist die Vorverarbeitung des Eingangs $M_{Mot,soll}$ durch einen Filter mit der Übertragungsfunktion des dazugehörigen Servomotors integriert, ermittelt wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Eine solche vorgeschaltete Berücksichtigung des Motorverhaltens macht die ganze Schätzung viel dynamischer, weil das Übertragungsverhalten des Servo-Motors, welches abhängig von der Parametrierung und Güte der Basis-SW ist, nicht erst durch den Kalman-Filter kompensiert werden muss.

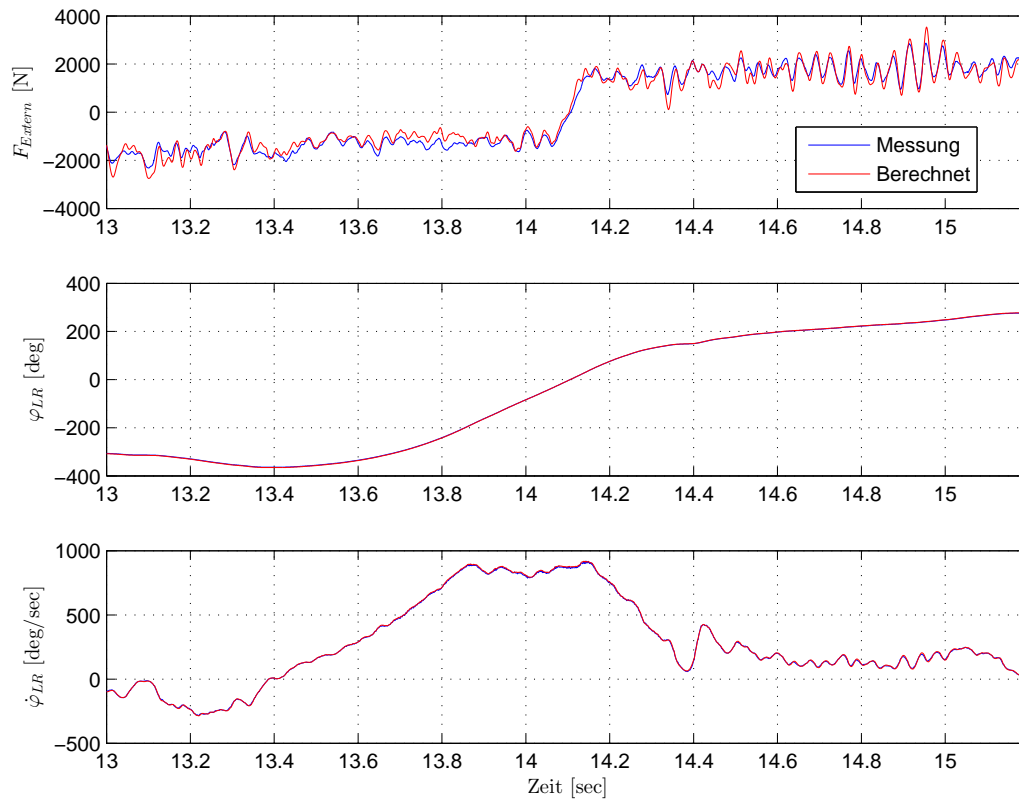


Abbildung 5.28: Zahnstangenkraftschätzung Untersteuern auf μ_{low}

Die Abbildung 5.29 zeigt den Einfluss einer solchen Berücksichtigung des Motor-Übertragungsverhaltens im ZKB auf das Rückmeldeverhalten des Lenksystems bei Verwendung der gleichen Reglerparametrierung.

Das Potenzial des Reglers wird dadurch sichtbar angehoben. Neben diesen Effekten zeigt die Darstellung auch die Auswirkung der Basis-SW, welche durch den Motor-Lieferanten integriert und abgestimmt wird, auf das Übertragungsverhalten der EPS. Es sind zwei Generationen der Basis-SW-Abstimmung bei identischer Parametrierung der High-Level-SW dargestellt.

Diese Untersuchungen verdeutlichen, dass die Abstimmung und Optimierung des Zahnstangenkraftbeobachters bezüglich Ergebnisgüte und Dynamik sowie des dynamischen Verhaltens des eingesetzten Elektromotors einen immensen Einfluss auf das Potenzial in der Reglerauslegung mit Hinblick auf das Rückmeldeverhalten besitzen.

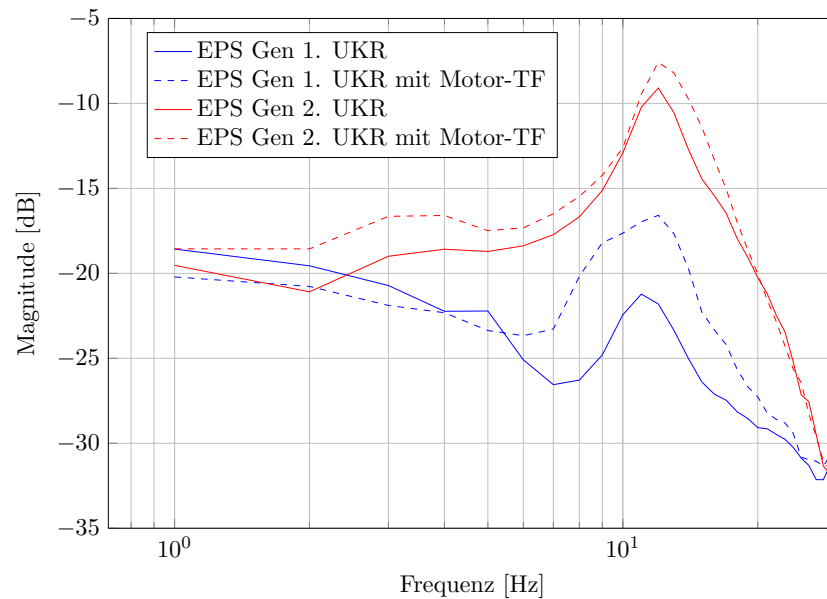


Abbildung 5.29: Übertragungsverhalten UKR unter Berücksichtigung des Motorübertragungsverhaltens

5.3.3 Validierung der Rückmeldung im Fahrzeug

Zur Validierung des Rückmeldeverhaltens eines Lenksystems im Fahrbetrieb wurden im Rahmen dieser Arbeit Bewertungskriterien für Reglerparametrierungen anhand folgender Fahrmanöver definiert:

- Übergang ins Übersteuern,
- Übergang ins Untersteuern,
- Kantenüberfahrt,
- Rücklauf in Richtung des Schwimmwinkels bei Hands-Off und
- Fahrt auf der Nürburgring-Nordschleife.

Diese werden im Folgenden anhand von ausgewerteten Messungen vorgestellt. Diese Auswertungen sollen die Wirkung der Unterstützungskraftregelung unter Beweis stellen und sie dienen vor allem im Entwicklungsverlauf als Bewertungsmethoden bei der Abstimmung des Reglers.

Übergang ins Übersteuern

Für ein Führen des Fahrzeugs im Grenzbereich ist es für den Fahrer sehr wichtig, stets Informationen über den Schlupfzustand der Antriebsachse sowie das Seitenkraftpotenzial an der Hinterachse durch die Lenkung vermittelt zu bekommen. Um diese Eigenschaft des Lenksystems zu bewerten, wird folgendes Fahrmanöver durchgeführt und anschließend anhand einer Messung diskutiert.

Getestet wird das initiale Anzeigen des Übersteuern-Zustands im Handmoment.

Das Manöver muss für bessere Reproduzierbarkeit und Beherrschung auf einem Untergrund mit Niederreibwert durchgeführt werden. Für die Messfahrt wird ein Fahrzeug mit Hinterachsantrieb und wenig Seitenkraftpotenzial auf der Hinterachse benötigt. Es wird ein konstanter Lenkwinkel eingestellt und das Fahrzeug langsam beschleunigt bis ins Übersteuern. Als Messgrößen werden das Handmoment, die Gierrate sowie der Lenkwinkel aufgezeichnet.

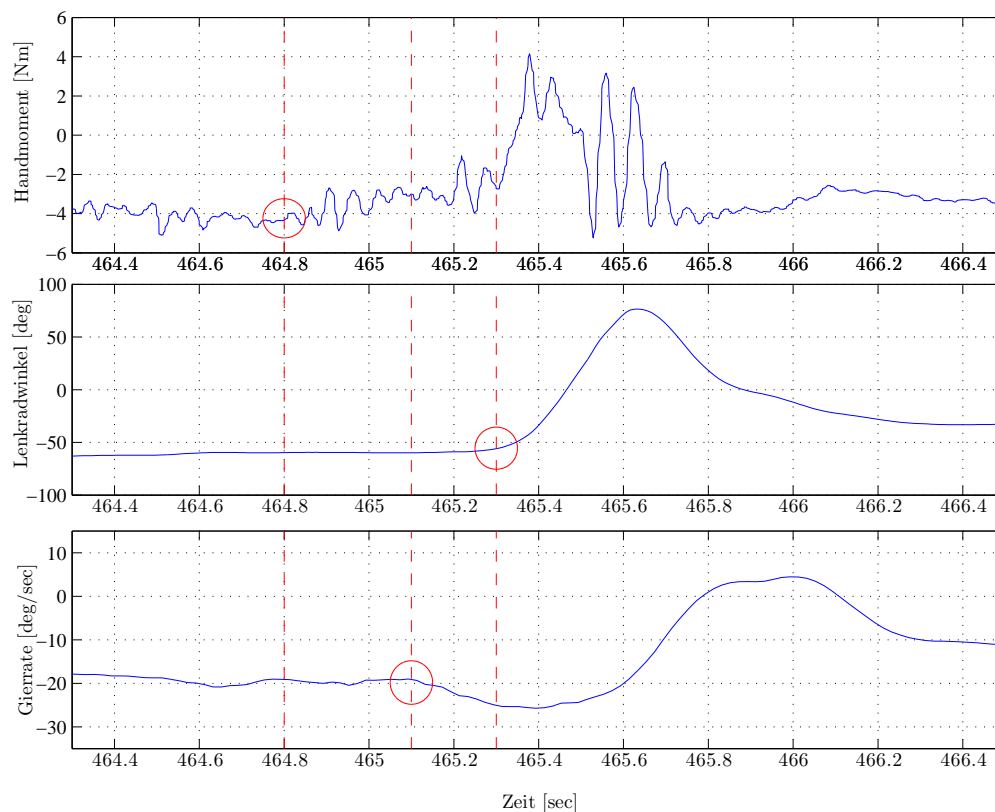


Abbildung 5.30: Rückmeldung im Übersteuern

Nach dem Übersteuern und Stabilisieren des Fahrzeugs wird die Messung abgebrochen.

Eine Aufzeichnung dieses Manövers ist in Abbildung 5.30 gezeigt.

Entscheidend für die Bewertung des Rückmeldeverhaltens des Lenksystems im initialen Übersteuern ist die Zeitdifferenz zwischen dem Start des Handmomentabfalls und dem Anstieg der Gierrate. Wie die obere Auswertung zeigt, fällt das Handmoment deutlich vor dem Gieranstieg des Fahrzeugs ab. Das bedeutet, dass das Lenksystem in der Lage ist, dem Fahrer über das Handmoment das Kraftmaximum an der Hinterachse aufzuzeigen noch bevor das Fahrzeugs instabil wird.

Diese Zeitdifferenz Δt wird in der Praxis als ein Qualitätsmerkmal bei der Abstimmung des Lenksystemreglers verwendet.

Übergang ins Untersteuern

So wie beim Übersteuern, ist es ebenfalls wichtig, frühzeitig Rückmeldung über den Übergang der Reifen an der Vorderachse in den nichtlinearen Bereich zu bekommen.

Für die Charakterisierung dieser Eigenschaft, wird folgendes Fahrmanöver durchgeführt. Bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit wird die Lenkwinkel langsam erhöht bis das Fahrzeug ins Untersteuern gerät. Hier ist es empfehlenswert, das Manöver auf Hochreibwert und mit einem untersteuernd ausgelegten Fahrzeug durchzuführen.

Die Abbildung 5.31 zeigt die Aufzeichnung dieses Manövers mit einem sehr transparent ausgelegten Lenksystemregler. Die Kennwerte für die Güte des Informationsflusses an den Fahrer bei diesem Manöver stellen der Zeitverzug Δt zwischen dem Start des Lenkmomentabfalls und des Abfalls der Gierrate sowie der Differenzbetrag ΔM des Lenkmoments zwischen Maximalmoment bei Start des Abfalls und Minimalmoment nach dem Abfall dar.

Wie diese Auswertung zeigt, ist es mit einem gut rückmeldenden Lenksystem ebenfalls möglich, den Übergang des Fahrzeugs ins Untersteuern noch vor der Fahrzeugreaktion zu erkennen.

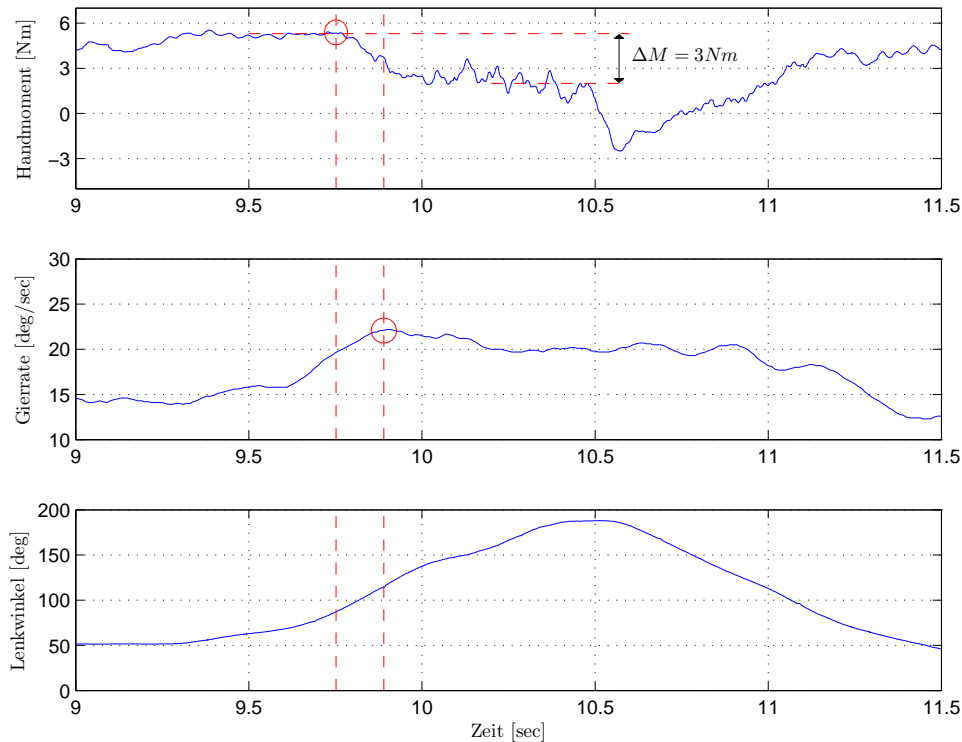


Abbildung 5.31: Rückmeldung im Untersteuern

Kantenüberfahrt

Um eine Abstimmung des Reglers in Bezug auf Stößigkeit subjektiv zu bewerten und objektive Kennwerte zu erhalten, wurde folgender Versuch mit den einzelnen Parametersätzen des Regler durchgeführt.

Mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h wird bei diesem Versuch eine definierte Fahrbahnkante mit der Höhe von ca. 50 mm mit leicht eingeschlagenen Rädern überfahren.

In der Auswertung wird, wie in Abbildung 5.32 dargestellt, ein Vergleich der aus der äußeren Anregung resultierenden Lenkmomentamplituden angestellt.

In der Darstellung wird ein Vergleich zwischen einem geregelten und einem gesteuerten Lenksystem unternommen. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz des Unterstützungskraftreglers die Rückmeldung hochfrequenter äußerer Anregungen stark angehoben wird.

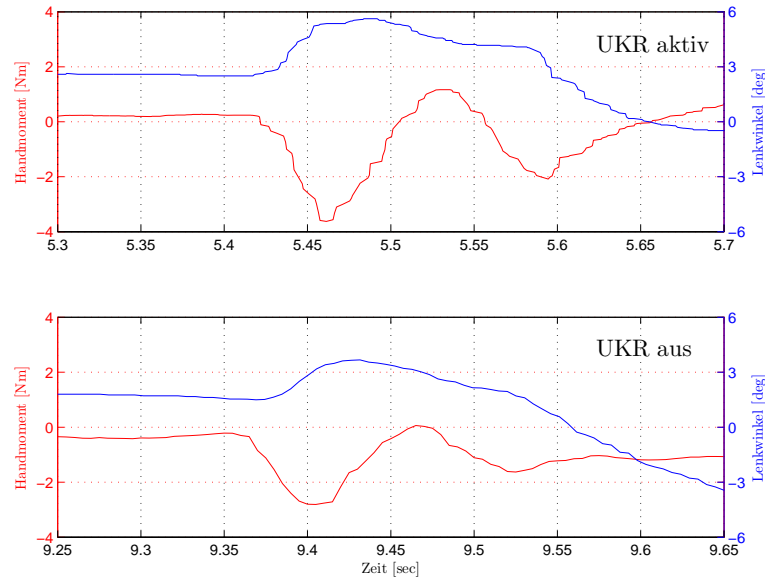


Abbildung 5.32: Vergleich Kantenüberfahrt Hands-On

Dieses einfache Manöver muss auch mit Hinblick auf die Beurteilung der Systemstößigkeit nach jeder Optimierungsschleife des Reglers zur subjektiven Bewertung durchgeführt werden.

Rücklauf in Richtung des Schwimmwinkels

Das Manöver zur Beurteilung des Rücklaufs eines Lenksystems gemäß der an der Vorderachse wirkenden Kräfte, ist die gängigste Bewertungsmethode der Rückmeldung und Natürlichkeit der Lenkung auf Niederreißwert. Dabei wird auf einem abgesperrten Testgelände mit einem sehr niedrigen, homogenen Reibwert bei einer variablen Fahrzeuggeschwindigkeit das Fahrzeug über das Lenksystem zum Übersteuern gebracht und das Lenkrad losgelassen.

Bewertet wird hierbei subjektiv der möglichst gleichmäßige Rücklauf des Lenkrads in Richtung des Schwimmwinkels und die entsprechende Selbststabilisierung des Fahrzeugs. Es wird vorallem auf den physikalisch richtigen Rücklauf des Lenksystems in Richtung des Kräftegleichgewichts an der Zahnstange geachtet. Das Fahrzeug muss sich möglichst schnell selbst stabilisieren. Falls sich das Fahrzeug aufschwingt oder mit einer konstanten Amplitude weiter um die z-Achse schwingt, deutet das auf zu hohe Reibungs- und Trägheitskräfte im Lenksystem, zu wenig Rückmeldung oder ungünstige

Applikation der Funktionsmodule.

In Abbildung 5.33 ist anhand eines solchen Manövers die Funktionsweise der Unterstützungskraftregelung verdeutlicht, welche auch in diesem Manöver die Natürlichkeit des Lenksystems durch die Abstimmung des Reglers statt durch zusätzliche Funktionsmodule unterstreicht.

Im oberen Plot sind die gemessenen Reglergrößen aufgetragen: Soll-Unterstützungsmoment $M_{UE,soll}$, Ist-Unterstützungsmoment $M_{UE,ist}$ und Regler-Stellkraft F_{UKR} . Im unteren Diagramm sind der gemessene Lenkwinkel φ_{LW} sowie das Lenkmoment M_{DS} dargestellt.

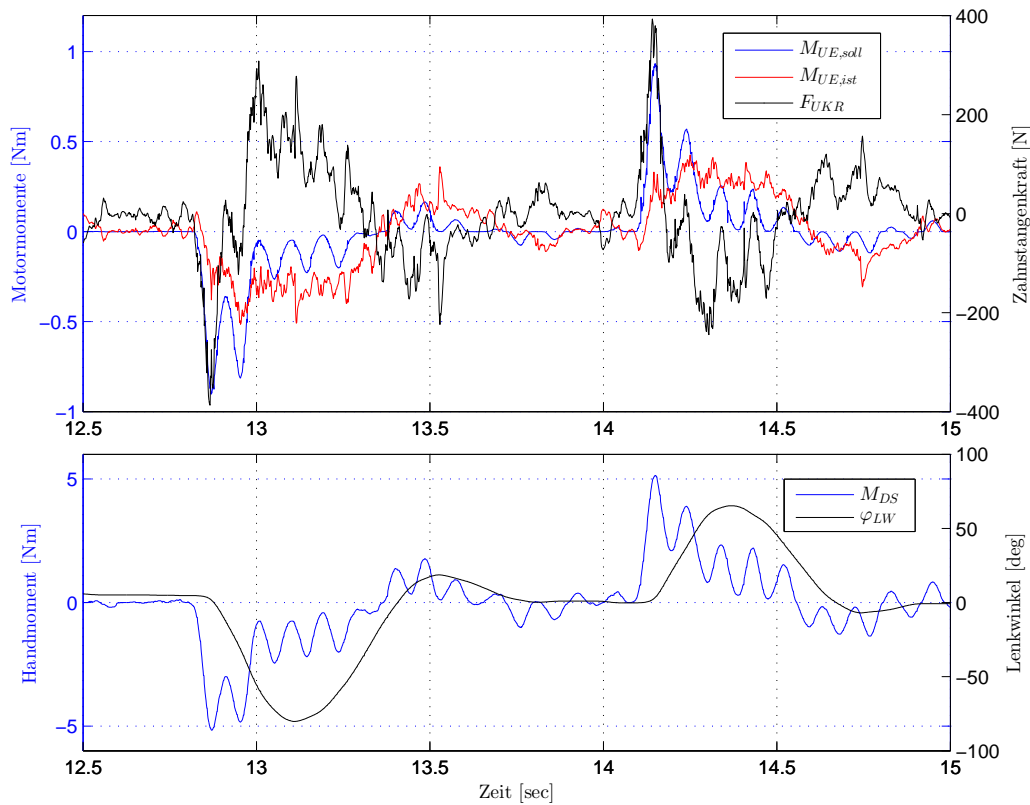


Abbildung 5.33: Rücklauf mit UKR auf μ_{low}

Bei genauer Betrachtung wird in dieser Messung die Unterstützung des Reglers beim Bereitstellen der rückstellenden Kraft auf den Schwimmwinkel erkennbar. Beim schnellen Auslenken des Lenksystems und Aufbringen des Handmoments schätzt der ZKB eine geringere Unterstützungskraft an der Zahnstange als von den Funktionsmodulen angefordert. Also wird vom Regler eine unterstützende, dynamisierende Kraft eingeleitet, um die Trägheitsinflüsse zu beseitigen und das Ansprechen zu verbessern. Sobald das Lenk-

rad losgelassen wird, fällt das Handmoment gegen null und bleibt auf einem niedrigen Wert, entsprechend der vorherrschenden Lenksäulenreibung. Die Funktionsmodule fordern eine proportional zum Drehstabmoment niedrige Unterstützungskraft an. Der Zahnstangenkraftbeobachter berechnet jedoch ein Trägheitsmoment aus der Antriebseinheit, welches über den Regler entsprechend der Regelabweichung kompensiert wird. Die Zahnstange wird also in Richtung der abnehmenden externen Kräfte bewegt.

Durch den Einsatz des Reglers wird also das physikalisch richtige Verhalten des Lenksystems auf Niederreibwert über die Kompensation der Trägheitsinflüsse aus der Servo-Einheit verbessert.

Fahrt auf der Nürburgring-Nordschleife

Als eines der wichtigsten Werkzeuge zur Abstimmung und subjektiven Validierung der Lenkungsrückmeldung für ein sportliches Fahrzeug gilt die Bewertung des Lenksystems auf der Nürburgring Nordschleife im Grenzbereich. Die Strecke bietet eine Vielzahl an möglichen Anregungsformen des Lenksystems aus Quer-, Längs- und Vertikaldynamik des Fahrzeugs. Unzureichende oder fehlende Informationen im Lenkrad äußern sich in einer Reduzierung des Sicherheitsempfindens, Fehlern in der Fahrzeugführung, Nichtausnutzung des Reifenpotenzials und schlussendlich in der erreichbaren Rundenzeit.

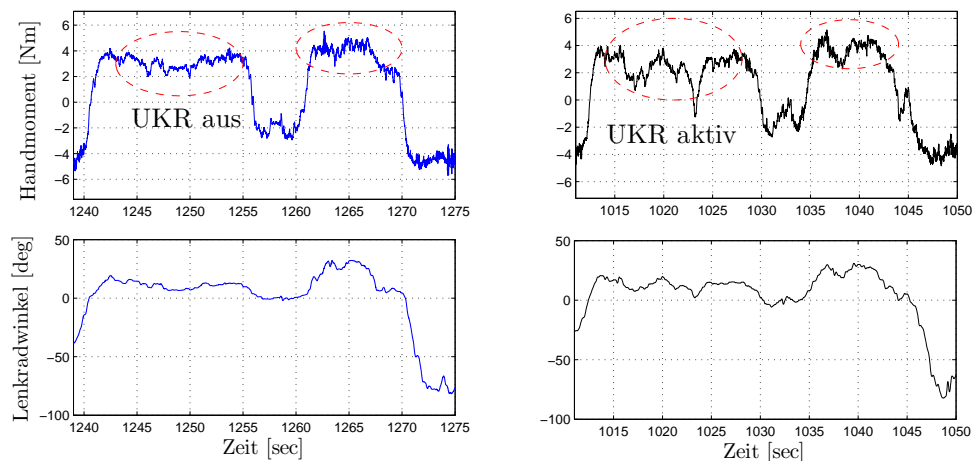


Abbildung 5.34: Vergleich Fahrbananregung Nordschleife Streckenabschnitt Schwedenkreuz

Die Entwicklungsfahrten auf der Nordschleife finden im Verlauf der Reglerentwicklung für ein Lenksystem zu einem sehr späten Zeitpunkt statt und stellen meist die letzten Optimierungsschleifen in der Reglerabstimmung dar. Diese Erprobungsfahrten werden unter höchsten Sicherheitsmaßnahmen und ausschließlich durch erfahrene Entwicklungsfahrer durchgeführt.

Um einen Eindruck des Reglereinflusses bei einer solchen Fahrt darzustellen sind in Abbildung 5.34 die aufgezeichneten Handmomente sowie Lenkwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeiten beim Befahren des Nordschleife-Abschnitts Schwedenkreuz abgebildet. Bei der Messung in blau, wurde der Regler im Lenksystem deaktiviert, während auf der rechten Seite dieser aktiviert ist. Beim Vergleich der Handmomente aus den beiden Messungen wird ersichtlich, dass beim aktivierten Regler in zwar leicht abweichenden Lenkwinkeln im Handmoment deutlich mehr Dynamik steckt, welche den Informationsgehalt aus der Fahrbahn widerspiegelt. Auch in der subjektiven Diskussion wird von den Fahrern stets bestätigt, dass das Führen des Fahrzeugs am Rande des fahrdynamischen Grenzbereichs mit aktiviertem UKR-Lenksystemregler deutlich zielgerichteter und intuitiver passiert.

Kapitel 6

Softwareentwicklungs- und Freigabeprozess

In diesem Kapitel wird der SW-Entwicklungsprozess nach dem aktuellen Stand der Technik vorgestellt, im Rahmen dessen die zuvor vorgestellten Konzepte bis zur Serienreife umgesetzt werden können. Im ersten Teil des Kapitels wird der allgemeine Entwicklungsprozess nach der Norm ISO26262 zusammengefasst. Im zweiten Teil werden Szenarien der Aufgabenteilung zwischen OEM und Lieferant in der SW- und Funktionsentwicklung vorgestellt.

Nach heutigem Stand der Technik ist die Entwicklung einer Software für ein mechatronisches Bauteil mit hohen Sicherheitsansprüchen nach der Norm für funktionale Sicherheit ISO 26262 durchzuführen. Die Prozesse für eine solche Entwicklung sind in Anlehnung an das V-Modell genau festgelegt, so dass es aus Kostensicht des OEM sehr aufwändig ist, die Flexibilität bei der Entwicklung beizubehalten. Bei geringen Änderungen in der festgelegten Software müssen die einzelnen Prozessschritte für die Gesamtsoftware wiederholt werden. Aus diesen Gründen muss die Trennlinie zwischen der Vor- und Serienentwicklung so strikt gezogen werden, dass die in der Konzeptbestätigungsphase festgelegten Anforderungen über den gesamten Serienentwicklungsprozess möglichst unverändert bestehen bleiben. Oft ist es allerdings der Fall, dass die Funktionalität der Software auch in der Laufzeit des Serienentwicklungsprozesses angepasst werden muss. Solche Änderungen und Anpassungen sind aufgrund der Prozessgestaltung auf Seiten des Zulieferers sehr kostenintensiv. Um diese Kosten gleich am Anfang des Entwicklungsprozesses zu minimieren, werden Generationsstufen der Software anhand eines Reifegradplans sowohl zeitlich, wie auch inhaltlich über den gesamten Entwicklungszeitraum zwischen OEM und Zulieferer vereinbart.

Im konventionellen Fall wird die gesamte Funktionsentwicklung auf Seiten des Zulieferers durchgeführt. Der OEM als Auftraggeber (AG) formuliert ein Lastenheft, in dem er die Anforderungen an die Software aus der Gesamtsystemsicht in Abstimmung mit dem Auftragnehmer (AN) zusammenfasst. Anhand dieser Vorgaben definiert der AN sein Entwicklungsvorgehen und legt die Kosten für den AG fest. In diesem Fall ist der Zulieferer in der Lage, seinen Prozess voraussehbar einzuhalten.

Oft hat der OEM den Anspruch eigens entwickelte Funktionsmodule in die bestehende Softwarearchitektur zu integrieren. Mögliche Gründe dafür sind Schaffung von Alleinstellungsmerkmalen gegenüber Wettbewerbern, die ihre Systeme vom gleichen Zulieferer beziehen, wie auch Geheimhaltung des unternehmensinternen Knowhows gegenüber dem Zulieferer. In einer solchen Situation stellt sich die Frage über die Vorgehensweise in der Zusammenarbeit mit dem Zulieferer.

Im folgenden Kapitel werden drei Vorgehensweisen bei Integration und Freigabe OEM-eigener Funktionsmodule in der Gesamtsoftware vorgestellt und jeweils aus Sichtweisen der entstehenden Kosten, des organisatorischen wie technischen Aufwands und der OEM-seitigen Entwicklungsflexibilität miteinander verglichen. Folgende Szenarien werden erläutert:

1. Gesamte Softwareentwicklung inkl. aller Funktionsmodule und Freigabeprozess beim Hauptzulieferer
2. Funktionale Softwareentwicklung beim OEM. Absicherung und Freigabe des Funktionsmoduls bei externem Dienstleister. Integration und Gesamtsoftwareabsicherung beim Hauptzulieferer.
3. Funktionale Softwareentwicklung und funktionale Absicherung beim OEM. Integration und Gesamtsoftwareabsicherung beim Hauptzulieferer

6.1 Allgemeiner Systementwicklungsprozess

Wie in Abbildung 6.1 dargestellt, gibt es im Laufe eines Entwicklungsprozesses eine klare Unterteilung in den Aufgaben zwischen OEM und Zulieferer. Die Abbildung stellt einen gewöhnlich praktizierten Prozess dar. Anhand einer solchen Prozessbeschreibung werden auf Seiten des OEM sowie des Lieferanten das Know-How und die notwendigen Entwicklungsressourcen ausgerichtet.

Das sogenannte V-Modell ist in Systemdesign und Systemintegration unterteilt. In beiden Entwicklungsabschnitten sind sowohl der OEM als auch der Zulieferer im Rahmen bestimmter Aufgaben involviert.

Wie die Abbildung zeigt, obliegt dem OEM in der Systemdesignphase die Definition des Gesamtsystems, in diesem Falle des kompletten Fahrzeugs, wie auch die Zusammenstellung der Anforderungen an die einzelnen Komponenten bzw. Baugruppen. Die Anforderungen werden unter äußerer Betrachtung des Gesamtsystems aufgestellt. Betrachtet werden hierbei grundsätzlich die Einflussparameter auf das System, wie auch der Systemeinfluss auf das Gesamtfahrzeug.

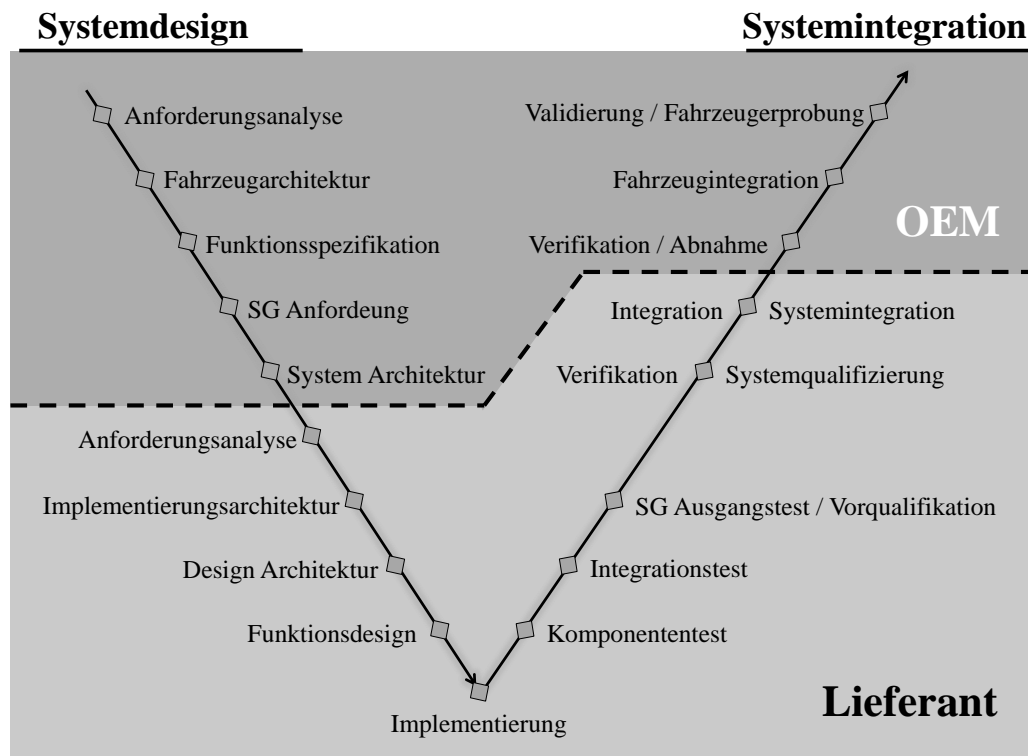


Abbildung 6.1: Systementwicklung nach dem V-Modell

In der Phase der Systemintegration erfolgt die Verifikation und Validierung der einzelnen Systeme auf der Gesamtfahrzeugebene auf Seiten des OEM.

Der Entwicklungsaufwand der einzelnen Baugruppen wird auf die einzelnen Systemlieferanten verteilt. Die Systementwicklung reicht hierbei von der genauen Anforderungsanalyse über die Komponentenimplementierung bis hin zur Systemintegration und Erteilung einer Freigabeempfehlung. Der Prozess

umfasst sowohl die Hardware- als auch Softwareentwicklung nach einem zertifizierten Prozess. Da sich dieser Absatz speziell auf den Softwareentwicklungsprozess ausrichtet, wird dieser im folgenden Unterkapitel genauer vorgestellt.

6.1.1 Softwareentwicklungsprozess nach ISO 26262

Nachdem die Anforderungen aus der Gesamtsystemsicht festgelegt sowie ein umfangreiches funktionales Sicherheitskonzept entwickelt wurde, beginnt die Phase der Hardware- und Softwareentwicklung.

Im Folgenden wird ein nach Norm festgelegter Prozess (Abbildung 6.2) zur Produktentwicklung auf Softwareebene in einzelnen Schritten näher beschrieben.

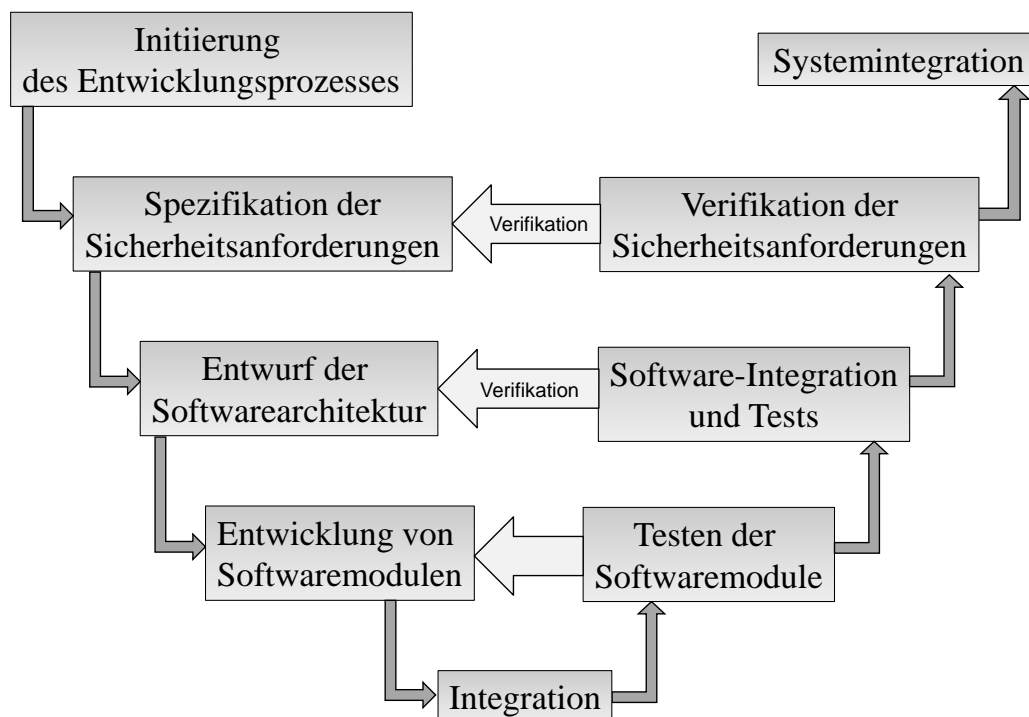


Abbildung 6.2: Softwareentwicklungsprozess [ISO, 2011]

Initiierung des Entwicklungsprozesses

Beim Initiierungsschritt werden die Rahmenbedingungen für die Softwareentwicklung festgelegt. Es werden Entwicklungsmethoden sowie die zu verwendenden Softwaretools definiert. Des Weiteren wird sich auf bestimmte Entwurfs- und Codierungsrichtlinien wie auch bezüglich geeigneter Modellierungs- und Programmiersprachen geeinigt.

Die Festlegung der Rahmenbedingungen in dieser frühen Phase erleichtert die tägliche Arbeit der Softwareentwickler erheblich und garantiert einen geringeren Aufwand bei der Integration der einzelnen Module durch Schaffung einer einheitlichen Struktur.

Spezifikation der Sicherheitsanforderungen

Die Sicherheitsanforderungen an die Software sind aus dem Systementwurf abzuleiten. Die wichtigsten Inhalte sind hierbei die Spezifikation der Hardware-Software-Schnittstelle, die Betrachtung der externen Schnittstellen, wie die Berücksichtigung aller Betriebszustände auf Hardware-, System- und Fahrzeugebene.

Für die Methoden zur Formulierung der Anforderungen gibt die Norm eine Empfehlung. Die Methoden sind, wie in Tabelle 6.1 dargestellt, in Abhängigkeit der ASIL-Einstufung des Gesamtsystems auszuwählen. Dabei wird in der ISO 26262 mit „semi-formal“ eine modellbasierte Umsetzung des Programms und mit „formal“ eine Anlehnung an mathematische Modelle ausgedrückt.

++ stark empfohlen + empfohlen	ASIL			
	A	B	C	D
Spezifikation in natürlicher Sprache	++	++	++	++
Informelle Notation / Entwurfsmethoden	++	++	+	+
Semi-formale Notation / Entwurfsmethoden	+	+	++	++
Formale Notation / Entwurfsmethoden	+	+	+	+

Tabelle 6.1: Empfehlung für Software-Entwurfsmethoden durch ISO 26262 [ISO, 2011]

Die Sicherheitsanforderungen an die Software müssen vor der Freigabe auf Richtigkeit, Vollständigkeit und Konsistenz überprüft werden. Diese Verifikation wird in Zusammenarbeit durch die Hardware-, Software- und Systementwickler durchgeführt.

Entwurf der Softwarearchitektur

Vor dem Entwurf der Gesamtarchitektur werden die Ziele und Anforderungen an diese durch die Softwareentwickler festgelegt. Allgemein zu berücksichtigen sind folgende Eigenschaften:

- Verifizierbare Softwarearchitektur
- Anpassbare Software
- Umsetzbarkeit der Softwaremodule
- Wartbarkeit und
- Testbarkeit der Software.

Diese nicht-funktionalen Anforderungen gewährleisten einen hohen Grad an Flexibilität im Entwicklungsprozess und minimieren das Fehlerpotenzial.

Um diesen Eigenschaften gerecht zu werden, muss die Software in der Komplexität der Komponenten und Schnittstellen so weit wie möglich beschränkt werden.

Bei einer Weiterentwicklung bestehender Software muss jede sicherheitskritische Komponente in der Architektur klassifiziert werden. Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden:

- Neuentwicklung,
- Wiederverwendung mit Änderungen,
- Wiederverwendung ohne Änderungen.

In den beiden ersten Fällen müssen die Module komplett nach ISO 26262 entwickelt werden. Bei einer Wiederverwendung ohne Änderungen müssen die entsprechenden Komponenten nach ISO-26262-8, 12 qualifiziert werden.

Parallel wird beim Architekturentwurf eine Sicherheitsanalyse nach ISO 26262-9 durchgeführt. Die Analyse soll folgende Ergebnisse bringen:

- ausreichende Unabhängigkeit bei Anwendung von Dekomposition,
- ausreichende Rückwirkungsfreiheit bei Koexistenz von Elementen,

- ausreichende Ressourcen bzgl. Laufzeit, Speicher und Bandbreite.

Zum Abschluss des Architekturentwurfs erfolgt die Verifikation. Dabei wird die Architektur auf die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen, Kompatibilität mit der Zielhardware und die Beachtung der Richtlinien beim Entwurf überprüft. Methoden dafür sind Reviews, Simulationen wie auch mathematische Methoden.

Entwicklung von Softwaremodulen und Integration

Die Voraussetzung für die Entwicklung und Integration von Softwaremodulen ist deren Spezifikation in der Softwarearchitektur. Die Schnittstellen sowie die Sicherheitsanforderungen müssen in der Phase der Architekturdefinition festgelegt worden sein.

Die Entwicklung der Module muss entsprechend den fixierten Entwurfs- und Kodierrichtlinien erfolgen. Diese Einhaltung der Rahmenbedingungen sorgt für einen korrekten Ablauf von Unterprogrammen und Funktionen, da die Konsistenz der internen Schnittstellen gegeben bleibt und der Daten- und Kontrollfluss zwischen einzelnen Modulen korrekt erfolgen kann.

So wie bei allen Schritten muss auch nach der Implementierung der Module eine Verifikation geschehen. Geprüft werden in diesem Schritt die Erfüllung der Hardware-Software-Schnittstelle, die vollständige Umsetzung der Sicherheitsanforderungen der Gesamtsoftware sowie die Einhaltung der vorgegebenen Spezifikationen und Kodierrichtlinien.

Auch zur Verifikation der Modulimplementierung gibt die ISO 26262 eine Empfehlung in Abhängigkeit von der Sicherheitseinstufung (Tabelle 6.2).

++ stark empfohlen + empfohlen - keine Empfehlung	ASIL			
	A	B	C	D
Informelle Verifikation durch walkthrough	++	+	-	-
Informelle Verifikation durch Inspektion	+	++	++	++
Semi-formale Verifikation	+	+	++	++
Formale Verifikation	-	-	+	+

Tabelle 6.2: Verifikationsmethoden der Modulimplementierung [ISO, 2011]

Testen der Softwaremodule

Beim Abprüfen der einzelnen Softwaremodule geht es um den Nachweis, dass alle Spezifikationen an das Modul erfüllt wurden und die Software keine Fehlfunktionalität enthält. Des Weiteren werden die Einhaltung der Hardware-Software-Schnittstelle und die Robustheit der Software gegenüber Störungen überprüft. Durch das Testen der Software auf dem Ziel-Steuergerät werden Informationen über die Auslastung der Rechenressourcen gewonnen.

Folgende Methoden zur Fehleridentifikation und Verifikation von Softwarebausteinen sind Stand der Technik und werden nach jedem Integrationsprozess durchlaufen:

- Anforderungsbasierter Test,
- Schnittstellentest,
- Fehleraufschaltungstest,
- Ressourcenverbrauchstest und
- Back-to-back-Vergleich zwischen Modell und Code.

Um die Vollständigkeit aller möglichen Testfälle überprüfen zu können, werden von der Norm die Prüf-Metriken Statement Coverage, Branch Coverage und Modified Condition/Decision Coverage (MC/DC) vorgegeben. Bei Statement Coverage wird überprüft, ob jede in der Software mögliche Anweisung mindestens einmal durchlaufen wurde. Branch Coverage stellt sicher, dass jeder Zweig mindestens einmal angesprochen wurde. MC/DC überprüft die Abhängigkeiten zwischen Ein- und Ausgängen und inwiefern jede Bedingung das Ergebnis beeinflussen kann.

Software-Integration und Tests

Beim Sicherstellen einer korrekten Software-Integration wird die Gesamtsoftware auf vollständige Erfüllung der Architekturspezifikationen überprüft. Parallel wird auch die Funktionalität untersucht. Hier werden die korrekte Implementierung sowie die Robustheit der Funktionsmodule betrachtet. Prinzipiell werden in dieser Absicherungsstufe die gleichen Tests wie zuvor bei den einzelnen Softwaremodulen durchgeführt.

Zur Abdeckung aller Funktionsumfänge werden zusätzlich die Tests Function Coverage und Call Coverage durchlaufen. Bei Function Coverage wird abgeglichen, ob jede Funktion mindestens einmal aufgerufen wurde und bei Call Coverage wird sichergestellt, dass jeder Funktionsaufruf durchgeführt wurde.

Verifikation der Software Sicherheitsanforderungen

In diesem letzten Schritt der Softwareentwicklung soll gezeigt werden, dass die integrierte Software alle am Anfang des Entwicklungsprozesses aufgestellten Sicherheitsanforderungen in vollem Umfang erfüllt. Es wird eine Testumgebung definiert. Die ISO26262 gibt auch an diesem Punkt eine von der ASIL-Einstufung abhängige Empfehlung.

In allen Testkonfigurationen wird überprüft, ob die Ergebnisse mit den Erwartungen übereinstimmen, alle Sicherheitsanforderungen abgedeckt und die Abnahmekriterien erfüllt sind.

++ stark empfohlen + empfohlen	ASIL			
	A	B	C	D
Hardware-in-the-Loop	+	+	++	++
Electric control unit network environments	++	++	++	++
Fahrzeuge	++	++	++	++

Tabelle 6.3: Empfehlung einer Testumgebung zur Software-Verifikation [ISO, 2011]

6.2 Szenarien der Softwareentwicklung und Absicherung

In diesem Kapitel sollen, wie in Abbildung 6.3 gezeigt, drei unterschiedliche Szenarien zur Gestaltung eines Serienentwicklungsprozesses aufgezeigt werden.

Als Ausgangsszenario steht der konventionelle Prozess, bei dem die Verantwortung zwischen OEM und Zulieferer wie folgt verteilt ist:

- Vorentwicklung, Anforderungsspezifikation und Freigaben auf Fahrzeugebene bei OEM

und

- gesamte funktionale Entwicklung, Absicherung und Implementierung einzelner Funktionen beim Zulieferer.

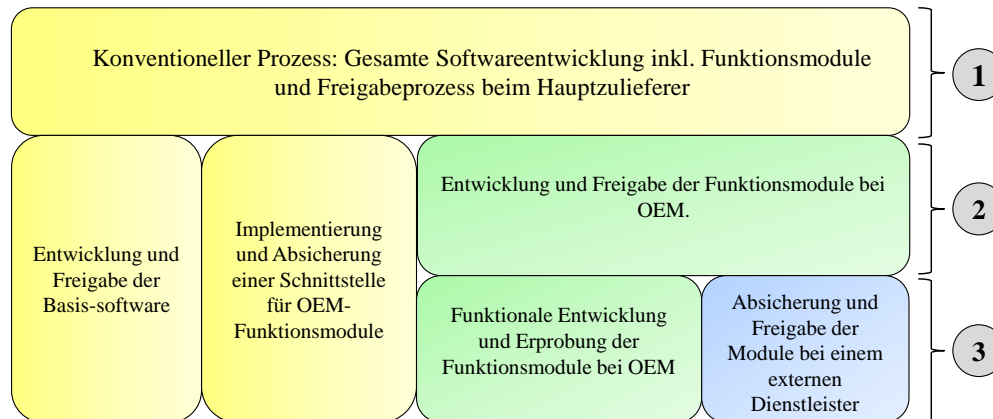


Abbildung 6.3: Mögliche Software-Entwicklungsszenarien

Die zwei weiteren Szenarien zeigen eine Umverteilung dieser Aufgaben und haben als Ziel eine Erhöhung der Flexibilität bei der Entwicklung und Implementierung OEM-eigener Funktionsmodule sowie eine Senkung der Entwicklungs- und Freigabekosten. Hierdurch werden die Alleinstellungsmerkmale gegenüber anderen Auftraggebern des Lieferanten gesichert.

6.2.1 Szenario 1 - Konventionelles Vorgehen

Der erste Prozess beschreibt die konventionelle Vorgehensweise. Bei einem solchen Projekt wird die gesamte Softwareentwicklung inklusive aller Funktionsmodule und der gesamten Softwareabsicherung an den Hauptzulieferer übergeben. Besteht beim OEM der Wunsch nach eigenen funktionalen Umfängen, so werden seinerseits Konzepte in Form von Dokumentationen und Modellen an den Zulieferer übergeben. Die Ansätze und Überlegungen werden hierbei vollständig offengelegt und gelten als Vorschläge.

Der Vorteil eines solchen Vorgehens für den Auftraggeber ist, dass die gesamte Verantwortung der Softwareabsicherung an den Lieferanten übergeben wird. Der Lieferant verfügt über eine erprobte Toolkette sowie eine hohe Komponentenkompetenz und Systemkenntnis. Ein weiterer Pluspunkt ist das bereits vorhandene Sicherheitskonzept auf der Lieferantenseite.

Sollte sich der OEM für dieses Entwicklungsszenario mit den entsprechenden Vorteilen entscheiden, müssen die damit einhergehenden Einschränkungen in Betracht gezogen werden. Die Anzahl der Evolutionsstufen wird durch die Kosten und Entwicklungsaufwände beschränkt sein. Damit kann die höchstmögliche funktionale Qualität nicht vollständig erreicht werden, da die Erprobung und Optimierung der Gesamtsoftware erst nach der Systemintegration geschehen kann. Bei Änderung der Spezifikationen auf Systemseite oder Anpassungen der einzelnen Module muss der gesamte zuvor vorgestellte Absicherungsaufwand für die Gesamtsoftware durchlaufen werden. Um die kalkulierten Kosten in einem abgestimmten Rahmen zu halten, werden auch hier Kompromisse eingegangen.

6.2.2 Szenario 2 - Entwicklung und Freigabe der Funktionsmodule beim OEM

Bei diesem Vorgehen wird die Entwicklung eigener Funktionsmodule aus dem konventionellen Entwicklungsprozess auf Zuliefererseite ausgegliedert. Die gesamten OEM-spezifischen Funktionsumfänge werden zu einem Gesamtmodul zusammenfasst und die zur Umsetzung notwendigen Modulschnittstellen spezifiziert.

Wie in Abbildung 6.4 zu sehen ist, wird beim OEM ein eigener Softwareentwicklungsprozess nach ISO 26262 erarbeitet und integriert. Hinzu kommt, dass eventuell fehlendes Know-How in der Softwareabsicherung aufgebaut werden muss. Als zusätzlicher Entwicklungsaufwand muss ebenfalls das Erstellen eines Sicherheitskonzepts inklusive aller Überwachungsfunktionen in die Eigenentwicklungskosten kalkuliert werden.

Trotz dieser Mehraufwände bleiben essentielle Vorteile bei dieser Projektstruktur bestehen. Es wird eine Möglichkeit für eine simultane und erprobungsnahe Entwicklung geschaffen, da alle vorhandenen Entwicklungsressourcen in voller Auslastung genutzt werden können. Zusätzlich verschafft sich der OEM Unabhängigkeit von der Lieferantentoolkette. Als monetärer Vorteil ist zu sehen, dass der Lieferant lediglich für eine Freigabe der Basissoftware und die Absicherung der Modulschnittstelle beauftragt wird. Die eigenen Freigaben der Funktionsmodule sind in der Regel mit geringerem Aufwand verbunden und zeitlich flexibler.

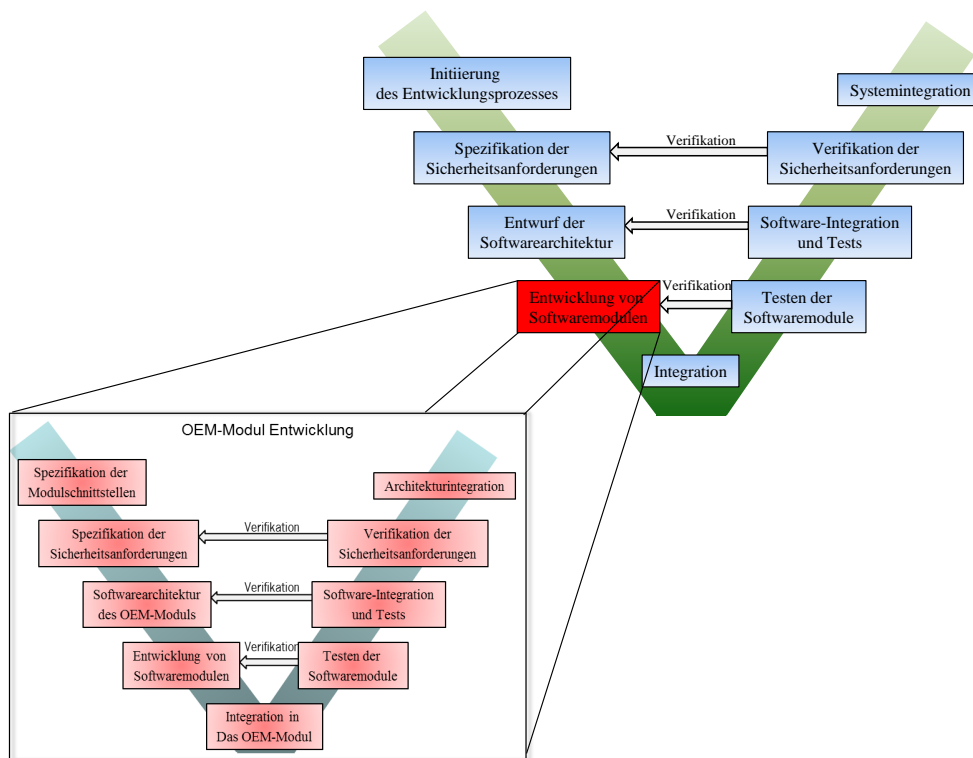


Abbildung 6.4: Ausgliederung der Modulentwicklung nach Szenario 2

6.2.3 Szenario 3 - Funktionale Konzeptentwicklung beim OEM und Absicherung über einen externen Dienstleister

Das dritte mögliche Entwicklungsszenario leitet sich aus dem Szenario 2 ab. Es wird wieder von einem Software-Sharing Prozess ausgegangen. Der Unterschied besteht darin, dass die gesamte Absicherung der Funktionsmodule an einen Zweitlieferanten übertragen wird, entsprechend dem blauen Pfad in Abbildung 6.5.

Die Motivation für solch eine Ausgliederung ist die Nutzung der bestehenden Kompetenzen im Absicherungs- und Freigabeprozess außerhalb des Unternehmens, wodurch kurzfristig die Entwicklungskosten gesenkt werden können.

Ansonsten bleiben alle Vorteile einer eigenen Funktionsentwicklung bestehen und es werden nach wie vor keine funktionalen Erkenntnisse gegenüber dem Hauptlieferanten offengelegt.

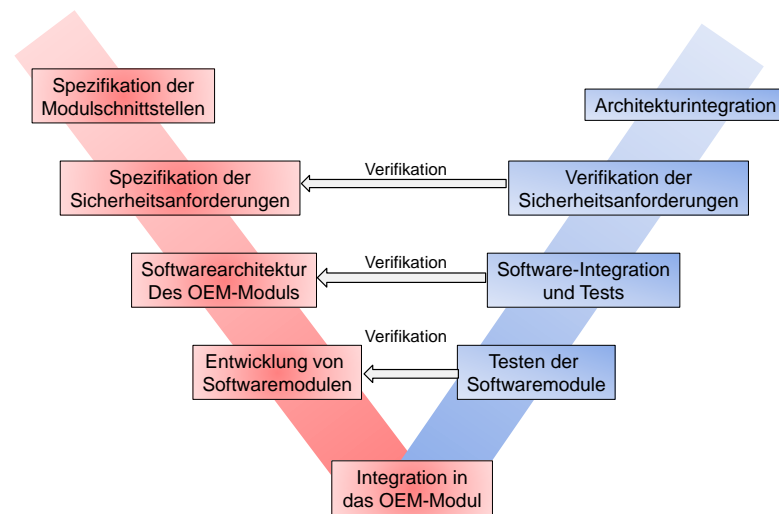


Abbildung 6.5: Aufgabenverteilung zwischen OEM und Dienstleister nach Szenario 3

6.3 Fazit

Abschließend kann festgestellt werden, dass jeder Software-Entwicklungsprozess individuell und in Abhängigkeit von

- dem jeweiligen Produkt,
- dem umzusetzenden Funktionsumfang und
- den vorhandenen Ressourcen

bezüglich der Aufgabenverteilung bewertet werden muss.

Generell ist festzustellen, dass die neue Norm zur funktionalen Sicherheit geschaffen wurde, um den Entwicklungsprozess zu unterstützen. Diese Unterstützung bedarf allerdings einer bedarfsgerechten Umsetzung der Norm, um eventuelle Einschränkungen in der Entwicklungsflexibilität zu vermeiden. Mechatronische Systeme bringen viele Potenziale und Vorteile mit sich. Deren höchstmögliche Ausnutzung erfordert allerdings eine genaue Abstimmung des Entwicklungsprozesses.

Die generelle Umsetzbarkeit unkonventioneller Projektgestaltungen hängt größtenteils von der Prozess-Flexibilität des Zulieferers und dem Engagement des OEMs ab.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Mechatronische Lenksysteme haben sich mittlerweile in allen Fahrzeugsegmenten durchgesetzt. Während aktuell auf dem Markt befindliche Lenksysteme alle Anforderungen eines konventionellen Personenkraftfahrzeugs erfüllen, existiert eine große Menge an Optimierungspotenzialen bezüglich des Einsatzes dieser Systeme in sportlichen Hochleistungsfahrzeugen.

In der vorliegenden Arbeit werden Methoden zur Konzeption einer Rückmeldungs- und Lenkgefühl-optimierten Funktionssoftware inklusive der dazugehörigen Regelungsarchitektur für ein elektromechanisches Lenkgetriebe mit dem Einsatz im sportlichen Fahrzeugsegment vorgestellt.

Nachdem im ersten Teil der Arbeit Simulations- und Prüfmethoden für Lenksysteme dargestellt werden, werden im Anschluss die Anforderungen an Lenksysteme im Allgemeinen nach dem aktuellen Stand der Forschung zusammengefasst. Diese werden anschließend in einzelne Bereiche klassifiziert und anhand von Bewertungskriterien genauer spezifiziert. Aus diesen Grundanforderungen erschließt sich im weiteren Verlauf die Menge an Anforderungen, welche durch die Funktionsbausteine in der High-Level-Software auf dem EPS-Steuergerät umgesetzt werden müssen. Diese gruppieren sich in zwei große Funktionsumfänge: Lenkgefühl und Rückmeldung.

Unter der Berücksichtigung dieser definierten Kriterien bezüglich Lenkgefühl werden in den weiteren Kapiteln bestehende Applikationsmodule sowie neu entwickelte Konzepte mit Hinblick auf ihren Wirkungsbereich und Applikationsaufwand vorgestellt und anhand entsprechender Vor- und Nachteile miteinander verglichen.

Des Weiteren stellt diese Arbeit eine kritische Diskussion der aktuell auf dem Markt befindlichen Regelungsarchitekturen an. Anschließend an die Betrachtung

tung dieser vorhandenen Architekturen wird im Weiteren in einer ausführlichen Form das Konzept, die Umsetzung sowie eine objektive Bewertung am Prüfstand und im Fahrzeug eines innovativen Regelungskonzeptes für EPS in Sportfahrzeugen vorgestellt. Hierbei handelt es sich um das Konzept der Unterstützungskraftregelung (UKR). Es konnte nachgewiesen werden, dass dieses neue Regelungskonzept in Verbindung mit den neuartigen Funktionsmodulen das Rückmeldungs-niveau in elektromechanischen Systemen deutlich steigert und die Applikation des Lenkgefühls aufgrund modularer Wirkungsbereiche der einzelnen Funktionen vereinfacht und zielführender wird.

Den abschließenden Teil dieser Dissertation stellt die Zusammenfassung des Software-Entwicklungsprozesses nach dem aktuellen Stand der Technik dar. Dieser Prozess nach ISO26262 umfasst alle Rahmenbedingungen für eine Software-Entwicklung bezüglich Anforderungsspezifikation, Absicherung und Testing für Bauteile mit den höchsten Sicherheitsanforderungen, so wie das bei einem elektromechanischen Lenksystem der Fall ist. Neben diesem vorgeschriebenen Prozess, werden abschließend drei Vorgehensweisen bei der Aufgabenteilung zwischen OEM- und Lieferant aus Sichtweisen des technischen und wirtschaftlichen Aufwands sowie der OEM-seitigen Entwicklungsflexibilität beschrieben.

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Funktions- und Regelungskonzept wurde bis zu Serienreife entwickelt und einen Serieneinsatz auf einem bestehenden Lenksystem erfahren. Die internen Rückmeldungen aus vielen Fahrabgleichen sowie die Testberichte aus zahlreichen Fachzeitschriften bestätigen das verbesserte Lenkgefühl sowie die gesteigerte Rückmeldung durch den Einsatz der neuen Software auf einem bereits in der Serie befindlichen Lenksystem.

Weitere Forschungs- und Entwicklungspotenziale bestehen in der Weiterentwicklung einzelner Funktionsmodule und der Umsetzung einer generischen Beobachter- und Reglerauslegung zur Abdeckung der Anforderungen weiterer Fahrzeugsegmente. Zudem stecken zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten in dem Umsetzungsprozess der Software sowie einem allgemein anwendbaren Applikationsprozess der Funktionsmodule.

Literaturverzeichnis

- [Adams 1981] ADAMS, F. J.: Power Steering “Road Feel”. In: *SAE-Paper* (1981), Nr. 830998
- [Aurell u. a. 2000] AURELL, J. ; FRÖJD, N. ; NORDMARK, S.: Correlation between Objective Handling Characteristics and Subjective Perception of Handling Quality of Heavy Vehicles. In: *Proceeding of AVEC 2000* (2000)
- [Barthenheier 2004] BARTHENHEIER, T.: *Potenzial einer fahrertyp- und fahr-situationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung*, Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, 2004
- [Bertollini u. Hogan 1999] BERTOLLINI, G. P. ; HOGAN, R. M.: Applying Driving Simulation to Quantify Steering Effort Preference as a Function of Vehicle Speed. In: *SAE-Paper* (1999), Nr. 01-0394
- [Bielaczek 1998] BIELACZEK, C.: Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr. In: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12* (1998)
- [Bielaczek 2001] BIELACZEK, C.: Auswirkungen einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit von PKW im realen Straßenverkehr. In: *Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen* (2001)
- [Bolte 2012] BOLTE, E.: *Elektrische Maschinen: Grundlagen Magnetfelder, Wicklungen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen*. Heidelberg : Springer, 2012. – ISBN 3642054854
- [Braess 2004] BRAESS, H. H.: Die schwierige Übung des richtigen Kurses. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, (2004), Nr. 11.5.2004
- [Brunn u. Harrer 2004] BRUNN, P. ; HARRER, M.: Objektivierung von Lenkungsrückmeldung. In: *2. Symposium Reifen und Fahrwerk* (2004)

- [Brunnschweiler 2005] BRUNNSCHWEILER, D.: Moderne Lenksysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2005), Nr. 2005-02
- [Burschardt 2003] BURSCHARDT, B.: Synthetische Lenkmomente. In: *VDI-Reihe 22* (2003), Nr. 12
- [Buschardt 2003] BUSCHARDT, B.: Synthetische Lenkmomente. In: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22* (2003)
- [Deppermann 1989] DEPPERMAN, K. H.: Geradeauslauf von Pkw – Fahrversuche und Berechnungen. In: *Automobil Industrie* (1989)
- [Dettki 1997] DETTKI, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw. In: *VDI-Berichte* (1997), Nr. 1335
- [Dettki 2002] DETTKI, F.: A test method for the quantification of on-centre handling with respect to cross-wind. In: *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers* (2002)
- [Döhring 1961] DÖHRING, E.: Über Wirkungsgrad und Elastizität von Automobil-Lenkgetrieben. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 63 (1961), Nr. 3
- [Eckstein u. Dellmann 2013] ECKSTEIN, L. ; DELLMANN, T.: *Mechatronische System in der Fahrzeugtechnik*. Aachen, RWTH Universität Aachen, Vorlesungsumdruck, 2013
- [Engels 1994] ENGELS, A.: *Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung. Dissertation*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1994
- [Engels 1995] ENGELS, A.: Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (1995), Nr. 6
- [Ersoy u. Heißing 2008] ERSOY, M. ; HEISSING, B.: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven; mit 76 Tabellen*. 2., verb. und aktual. Aufl. Vieweg + Teubner : Wiesbaden, 2008 (Praxis ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [Farrer 1993] FARRER, D.: An Objective Measurement Technique for the Quantification of On-Centre Handling. In: *SAE-Paper* (1993), Nr. 930827

- [Fiala u. Ernst 2006] FIALA ; ERNST: *Mensch und Fahrzeug: Fahrzeugführung und sanfte Technik*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006. – ISBN 383489026X
- [Frank u. Reichelt 1990] FRANK, P. ; REICHELT, W.: Funktion, Wirksamkeit und Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen. In: *Forschungsinstrument Fahrsimulator* (1990)
- [Fülbiel 2005] FÜLBIER, C.: *Entwicklung einer Methode zur Bewertung des Fahrkomforts bei impulshaltiger stochastischer Fahrbahnanregung*, Fachhochschule Köln, Diplomarbeit, 2005
- [Geringer 2004] GERINGER, Bernhard: *Bericht des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der Technischen Universität Wien (IVK)*. Bd. 580: 2. Symposium "Reifen und Fahrwerk" 27. September 2004. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2004. – ISBN 3-18-358012-8
- [Good u. a. 1982] GOOD, M. C. ; DOREY, A. D. ; JOUBERT, P. N.: Evaluation of Automobile Handling Test Procedures Using a Variable Characteristic Car. In: *Proceedings of 19th Fisita World Congress* (1982)
- [Grassmann u. a. 2003] GRASSMANN, O. ; HENRICHFREISE, H. ; NIESSEN, H. ; HAMMEL, K. von: Variable Lenkunterstützung für eine elektromechanische Servolenkung. In: *Elektronik im Kfz* 23. Tagung Stuttgart (2003)
- [Green u. a. 1984] GREEN, P. ; GILLESPIE, T. ; REIFEIS, S.: Subjective Evaluation of Steering Effort Levels. In: *UMTRI* (1984), Nr. 84-39
- [Harnett 2002] HARNETT, P.: Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality. In: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12* (2002), Nr. 506
- [Harrer u. a. 2006] HARRER, M. ; SCHMITT, T. ; FLECK, R.: Elektromechanische Lenksysteme - Herausforderungen und Entwicklungstrends. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (2006)
- [Hesse 2011] HESSE, B.: *Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2011
- [Higuchi u. Sakai 2001] HIGUCHI, A. ; SAKAI, H.: Objective Evaluation Method of On-Center Handling Characteristics. In: *SAE-Paper* (2001), Nr. 01-0481

- [Higuchi u. a. 1996] HIGUCHI, M. ; KUSAKA, K. ; SHIBUSAWA, K.: Handling Analysis and Prediction during Cornering. In: *Proceeding of AVEC 1996*, (1996)
- [Hisaoka u. a. 1996] HISAOKA, Y. ; YAMAMOTO, M. ; FUJINAMI, H.: Study Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling. In: *Proceedings International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)* (1996)
- [Hsu u. a. 2012] HSU, H. ; HARRER, M. ; GAEDKE, A. ; GRÜNER, W.: Die neue EPSapa im Porsche 911 – Anforderungen und Auslegung einer Lenkung für den Sportwagen. In: *ATZ Chassis Tech Plus* 3rd International Munich Chassis Symposium (2012)
- [Huang 2003] HUANG, P.: *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*, Technischen Universität München, Dissertation, 2003
- [ISO 2011] ISO: *ISO26262 Road vehicles – Functional safety* –. 2011
- [Jablonski u. a. 2008] JABLONSKI, T. ; SCHUMANN, H. ; BUSSE, C. ; HAUSMANN, H. ; HALLMANN, U. ; DREYER, D. ; SCHÖTTLER, F.: Die neue elektromechanische Lenkung APA-BS. In: *ATZelektronik* 3 (2008), Nr. 1, S. 30–35. – ISSN 2192–8878
- [Koch 2010] KOCH, T.: *Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-by-Wire Lenksystemen*, Technischen Universität München, Dissertation, 2010
- [Koide u. Kawakami 1988] KOIDE, M. ; KAWAKAMI, S.: Analysis of 'Steering Feel' Evaluation in Vehicles with Power Steering. In: *JSAE Review* (1988), Nr. 9/3
- [Lunkeit 2014] LUNKEIT, D.: *Ein Beitrag zur Optimierung des Rückmelde- und Rückstellverhaltens elektromechanischer Servolenkungen*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2014
- [Mitschke u. Wallentowitz 2004] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4., neubearb. Aufl. Berlin : Springer, 2004 (VDI). – ISBN 9783540420118
- [Mouri u. a. 2007] MOURI, H. ; KUBOTA, M. ; HORIGUCHI, N.: Study on Effects of Transient Steering Efforts Characteristics on Driver's Steering Behavior. In: *SAE-Paper* (2007), Nr. 03 0823

- [Neureder 2001] NEUREDER, U.: Modellierung und Simulation des Lenkstranges für die Untersuchung der Lenkungsunruhe. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2001-03)
- [Norman 1984] NORMAN, K. D.: Objective Evaluation of On-Center Handling Performance. In: *SAE-Paper* (1984), Nr. 840069
- [Odenthal u. a. 2003] ODENTHAL, D. ; BÜNTE, T. ; HEITZER, H.-D. ; EICKER, C.: Übertragung des Lenkgefühls einer Servo-Lenkung auf Steer-by-Wire. In: *Automatisierungstechnik* (2003), Nr. 51
- [Peppler 1999] PEPPLER, S.: Steering System Effects on On-Center Handling and Performance. In: *SAE-Paper* (1999), Nr. 01-3765
- [Pfeffer u. Harrer 2013] PFEFFER, P. ; HARRER, M.: *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. 2., überarb. u. erg. Aufl. 2013. Wiesbaden, s.l : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [Pfeffer u. a. 2008] PFEFFER, P. E. ; HARRER, M. ; JOHNSTON, D. N.: Interaction of vehicle and steering system regarding on-centre handling. In: *Vehicle System Dynamics* 46 (2008), Nr. 5, S. 413–428. – ISSN 0042–3114
- [Poirel 2012] POIREL, P.: Perspektiven für die elektromechanische Lenkung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2012), Nr. 2012-06
- [Reimpell 1984] REIMPELL, J.: *Fahrwerktechnik: Lenkung: Anforderungen, Mangel, Lenkarbeit, Lenkelastizität, Einzelteile der Lenkanlage, Lenkübersetzung, Lenkinematik bei Starrachsen und Einzelradaufhängungen*. Würzburg : Vogel, 1984 (Vogel-Fachbuch Technik)
- [Runge u. a. 2010] RUNGE, W. ; GAEDKE, A. ; HEGER, M. ; VÄHNING, A. ; REUSS, H.-C.: Elektrisch lenken: Notwendige Effizienzsteigerungen im Oberklassesegment. In: *VDI-VFT-Jahrbuch* 2010-03 (2010)
- [Sato u. a. 1991] SATO, H. ; OSAWA, H. ; HARAGUCHI, T.: The Quantitative Analysis of Steering Feel. In: *JSAE Review* (1991), Nr. 12/2
- [Schimmel 2010] SCHIMMEL, C.: *Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*. München, Technischen Universität München, Dissertation, 2010
- [Schramm u. a. 2016] SCHRAMM, Dieter ; HESSE, Benjamin ; MAAS, Niko ; UNTERREINER, Michael: *Fahrzeugtechnik: Technische Grundlagen aktueller und zukünftiger Kraftfahrzeuge*. Berlin : De Gruyter Oldenbourg, 2016

- [Schramm u. a. 2017] SCHRAMM, Dieter ; HILLER, Manfred ; BARDINI, Roberto: *Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*. Berlin : Springer, 2017
- [Schröder 2009] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. 3. bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540896139
- [Seinsch 1993] SEINSCH, H. O.: *Grundlagen elektrischer Maschinen und Antriebe*. 3., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1993. – ISBN 9783519061649
- [Shimakage 2001] SHIMAKAGE, M.: Design of Lane-Keeping Control With Steering Torque Input for a Lane-Keeping Support System. In: *SAE-Paper* (2001), Nr. 01-0480
- [Spring 2009] SPRING, E.: *Elektrische Maschinen: Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 3642008852
- [Suzuki u. a. 1994] SUZUKI, H. ; HARARA, M. ; KUMAKARA, H.: Study on Suitable Steering Feeling for Various Driving Conditions – by Controlling Power Steering Assist Characteristics. In: *Proceedings International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)* (1994)
- [Uselmann 2012] USELMANN, A.: *Entwicklung und Validierung eines beobachterbasierten Unterstützungskraftreglers auf einem APA-EPS Lenkgetriebe*. RWTH, Aachen, Diplomarbeit, 2012
- [Uselmann u. a. 2016] USELMANN, A. ; DUESTERLOH, D. ; SCHRAGE, B. ; PREISING, E.: Charaktertest für die Lenkung: Entwicklung und Abstimmung von elektrischen Lenksystemen mit mechatronischen HIL-Verfahren. In: *dSPACE Magazin* (2016), Nr. 02
- [Waldmann 1974] WALDMANN, D.: *Beitrag zum Verhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug unter besonderer Berücksichtigung von Lenkübersetzung und Lenkmoment*. München, Technischen Universität München, Dissertation, 1974
- [Waldmann 1975] WALDMANN, D.: Untersuchungen zum Einfluss der Eigenschaften des Lenksystems auf das Verhalten des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug. In: *Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik* (1975), Nr. 247

-
- [Wolf u. Bubb 2003] WOLF, H. ; BUBB, H.: *Status Lenkgefühl, Stand 06.* München, Bericht, 2003
- [Wolf 2008] WOLF, H. J.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen.* München, Technischen Universität München, Dissertation, 2008

Publikationen und Patente

Publikationen

- | | |
|---------------|---|
| Oktober 2016 | Charaktertest für die Lenkung: Entwicklung und Abstimmung von elektrischen Lenksystemen mit mechatronischen HIL-Verfahren, dSpace Magazin 02/2016, Paderborn, 2016 |
| Juni 2015 | Innovative software functions to operate electric power steering systems in sports cars – Unterstützungskraftregelung (UKR), 6th International Munich Chassis Symposium, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015 |
| Dezember 2013 | Optimierung der Software- Freigabeprozesse im Automobilbau unter Beachtung der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262, 5. Wissenschaftsforum Mobilität Duisburg, Radikale Innovationen in der Mobilität, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014 |

Patente

- | | |
|--------------|--|
| Oktober 2015 | DE 10 2014 105 088 A1: Regler für ein elektromechanisches Lenksystem, Lenksystem mit einem solchen Regler sowie Kraftfahrzeug mit einem solchen Lenksystem |
| Juli 2015 | DE 10 2014 100 639 A1: Verfahren zum Steuern einer Widerstandskraft einer Lenkeinrichtung |

-
- | | |
|---------------|--|
| April 2015 | DE 10 2013 110 149 A1: Steuern einer Lenkung in einem Kraftfahrzeug |
| Dezember 2014 | DE 10 2013 106 449 A1: Lenkrad für ein Test- und/oder Entwicklungsfahrzeug |
| Mai 2014 | DE 10 2012 107 781 A1: Verfahren zum Betreiben mindestens eines mechatronischen Systems in einem Kraftfahrzeug |